



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

TENKOVRSŤVÉ SYSTÉMY

THIN-FILM SYSTEMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Kuchařík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Miroslav Zatloukal

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

Student: Jan Kuchařík

ID: 206263

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Tenkvrstvé systémy

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte možnosti vytváření tenkých vrstev na různých substrátech. Seznamte se s obsluhou magnetronového naprašovacího zařízení, zhotovte testovací vzorky a proveďte posouzení jejich základních parametrů. Na základě výsledků navrhněte postup zhotovení tenkovrstvých systémů. Zhodnoťte naměřené výsledky, doporučte úpravu technologických postupů pro jejich přípravu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 8.6.2020

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Zatloukal

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá tvorbou tenkých vrstev na různé druhy substrátů. V rámci teoretické části je přehled tvorby tenkých vrstev pomocí několika technik. V práci se nachází přehled používaných procesů čištění substrátů před depozicí tenké vrstvy a nástroje pro vyhodnocování jejich vlastností. V jejím závěru je rozebrána metoda maskování.

V experimentální části proběhlo seznamování s naprašovacím zařízením NP – 12 a výroba vzorků. Byla vyhodnocena adheze vyrobených vzorků. Následovala elektrodpozice vzorků s titanovým povlakem. Závěrem proběhlo maskování křemíkového substrátu.

Klíčová slova

Tenká vrstva, elektrodpozice, naprašování, napařování, tloušťka, odpor na čtverec, předúprava povrchu, adheze, maskování.

Abstract

This bachelor thesis concerns to create of thin films on various types of substrates. In the theoretical parts is an overview of the formation of thin films using several techniques. The thesis contains an overview of substrate cleaning processes before the deposition of layer plates and tools for evaluating their properties. Finally, the masking method is discussed.

In the experimental part, the acquaintance with the NP - 12 sputtering device and the production of samples took place. The adhesion of the produced samples was evaluated. Electrolysis of samples with titanium coated followed. Finally, the silicon substrate was masked.

Keywords

Thin film layer, electrodeposition, sputtering, evaporation, thickness, resistance per square, surface pretreatment, adhesion, masking.

Kuchařík, J. *Tenkovrstvé systémy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie, 2020. 56 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Miroslav Zatloukal.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: Jan Kuchařík

VUT ID studenta: 206263

Typ práce: Bakalářská práce

Akademický rok: 2019/20

Téma závěrečné práce: Tenkovrstvé systémy

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 3. června 2020

.....
Podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Miroslavu Zatloukalovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval Bc. Filipu Šmatlovi za seznámení se zařízením NP-12.

V Brně dne: 3. června 2020

.....

podpis autora

OBSAH

Úvod.....	1
1. Tenké vrstvy.....	2
1.1 Vlastnosti tenkých vrstev	2
1.2 Technologie přípravy tenkých vrstev	3
1.2.1 Nevakuové metody	3
Elektrodepozice	3
Sol-gel metody	4
1.2.2 Vakuové metody	5
Chemická depoziční metoda – CVD	5
Fyzikální depoziční metoda – PVD	5
c) Iontové naprašování.....	7
d) Reaktivní naprašování	8
e) Magnetronové naprašování	8
Mechanismus vytváření vrstev	10
1.3 Podložky.....	11
1.4 Před depoziční přípravy tenkých vrstev	12
Mechanické úpravy povrchu substrátu	12
Chemické úpravy povrchu substrátu.....	13
Ultrazvukové čištění	14
Úprava povrchu plasmou	15
1.5 Měření tloušťky tenkých vrstev	15
Destruktivní metody měření	15
Nedestruktivní metody měření.....	16
1.6 Elektrické veličiny	18
Měření elektrického odporu.....	18

Měření kapacity	20
1.7 Neelektrické veličiny	20
Měření adheze.....	20
Určení vnitřního pnutí.....	22
Měření tvrdosti.....	22
Chemická stálost a stabilita v prostředí	22
1.8 Maskování	23
Fotolitografie	23
Fotorezist	23
2. Praktická část	25
2.1 Použité substráty	25
Mikroskopické podložní sklo.....	25
Korundová keramika.....	26
Křemíkový wafer	27
Hliník	28
Polystyren	29
2.2 Seznámení s magnetronovým naprašovacím zařízením	29
Spuštění zařízení	31
Odstavení zařízení.....	32
2.3 Zhotovení vzorků	32
Příprava vzorků.....	32
Čištění vzorků	33
Depozice	33
Zkouška adheze.....	35
2.4 Tenkovrstvý systém	41
Galvanizace.....	41
Maskování.....	46

Závěr	48
Literatura.....	50
Seznam obrázků.....	54
Seznam tabulek	56

ÚVOD

Trh s tenkovrstvými produkty se stále rozšiřuje již od poloviny devadesátých let minulého století, a to hlavně o technologie a výrobky využívané zejména v mikroelektronice, optice, biomedicině, očním lékařství, farmacii, telekomunikaci či letectví.

V mnoha případech však tenké vrstvy nejsou nanесeny pouze z jednoho materiálu a v jedné vrstvě. Několik tenkých vrstev, deponovaných na sobě, se nazývá tenkovrstvý systém. V tomto systému má každá vrstva určitý význam. První nanесená vrstva na substrátu může zlepšovat adhezi, tvořit izolační vrstvu mezi substrátem a další vrstvou, nebo naopak může sloužit pro pokovení izolantu, při galvanickém nanášení kovové vrstvy. Další vrstvy plní funkční úlohy, jako jsou například odporové, vodivé případně dielektrické. Vnější vrstva většinou plní funkci ochranná vrstvy pro systém, případně také může být vrstvou funkční.

V posledních letech nastává rozvoj fyzikálních technologií při výrobě tenkých vrstev. Jednou z fyzikálních metod výroby tenkých vrstev, je magnetronové naprašování. Proto se i tato práce bude hlavně zabývat tenkovrstvými systémy, které měly být vytvořeny magnetronovým naprašováním na zařízení NP-12.

1. TENKÉ VRSTVY

Technologie depozičního procesu vrstev musí splňovat požadavky pokročilých tenkovrstvých povlakových struktur, jako jsou struktury vrstev, nanolamináty a nanokompozity s pokročilými procesy, materiály a mikrostrukturami, kontrolou a snižováním nákladů [1].

Jednoznačně však nelze klasifikovat, do jakého rozměru se jedná o tenké vrstvy. Většinou jde o vrstvy v rozmezí tloušťky desítek nm až jednotek μm . Důsledkem toho neplatí stejné fyzikální konstanty a vlastnosti jako u normálních materiálů. Tím je docíleno jejich mimořádných elektrických vlastností (vrstvový odpor, teplotní součinitel odporu atd.), čehož je právě v elektronice při realizaci struktur využíváno [2][3].

V tomto odvětví jsou nejvíce používané fyzikální metody. Nanášení materiálů probíhá celoplošně, nejčastěji v uzavřeném vakuovém prostoru. Pro vytvoření topologických tvarů se v případě potřeby používá maska z fotorezistu, poté se tenká vrstva odleptá [3].

1.1 Vlastnosti tenkých vrstev

Vlastnosti tenkých vrstev jsou významnou měrou ovlivňovány jejich tloušťkou. Vrstvy se připravují z materiálů vodivých, polovodivých i nevodivých na různých podložkách, přičemž mohou plnit funkci vodičů, dielektrik, izolantů, supravodičů, polovodičů, ale také jako vrstvy optické, magnetické atd. Tenké vrstvy mají s ohledem na svou strukturu řadu vlastností odlišných od vlastností základního materiálu. Za nejvýznamnější vlastnosti lze považovat následující:

- Elektrická vodivost – je dána tloušťkou vrstvy a mechanismy vodivosti, které se ve vrstvě uplatňují.
- Dielektrické vlastnosti – jsou dány především dielektrickou konstantou vrstev a dielektrickými ztrátami. Často jsou sledovány i teplotní a frekvenční relaxace vrstev.
- Supravodivost a feromagnetické vlastnosti.
- Adheze – adhezní vlastnosti vrstev jsou dány zejména počátečními poměry při růstu vrstev. Obecně platí, že vrstvy, které vytváří s podložkou chemické vazby, mají vyšší adhezi než ty, které jsou na povrch navázány pouze fyzikálními vazbami.
- Vnitřní napětí – je vyvoláno zejména rozdílnostmi teplotních koeficientů vrstvy a substrátu. To je způsobeno tím, že vrstva bývá deponována za vysoké teploty nanášeného materiálu. Toto napětí se dá částečně odstranit vyžeháním vrstvy po jejím nanesení.
- Tvrdost a pevnost.
- Chemické vlastnosti – chemická stálost, odolnost vůči agresivním látkám, nízká rozpustnost v rozpouštědlech a odolnost proti působení vody a vlhka.

- Stabilita vlastností v prostředí – zahrnuje např. odolnost vůči intenzivnímu elektromagnetickému záření, dlouhodobému působení UV nebo viditelného záření a teplotě [4].

1.2 Technologie přípravy tenkých vrstev

Tenkovrstvé technologie se dělí na vakuové a nevakuové. Obvykle se pohybujeme u tloušťky do jednoho μm . Větší tloušťky jsou nákladnější a značně se u nich mění fyzikální vlastnosti nanesené vrstvy.

Mezi nevakuové depoziční techniky patří:

- **elektrodepozice** (electrochemical deposition – elektrochemická depozice)
- **sol-gel techniky**

Vakuové techniky přípravy tenkých vrstev rozdělujeme na:

- **chemické CVD** (chemical vapor deposition – chemická depozice z plynné fáze)
fyzikální PVD (physical vapor deposition – fyzikální depozice z plynné fáze) [4].

1.2.1 Nevakuové metody

Elektrodepozice

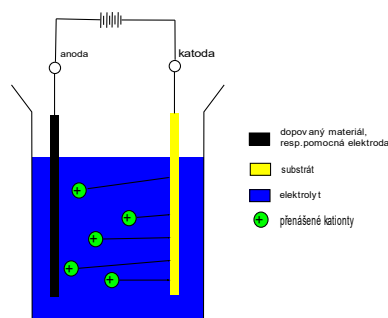
Elektrochemická depozice, zkráceně elektrodepozice, také nazývaná elektrolytické nebo galvanické pokovování. Používá se k dekorativním i technickým účelům. Patří mezi separační metody.

Mechanismus elektrolytického vylučování kovů lze vysvětlit pochody ve vodních roztocích anorganických solí. Rozpouštěním soli ve vodě (elektrolytická disociace) se zruší krystalová mřížka těchto solí a vznikají ionty, které se volně pohybují. Disociací uvolněné záporné ionty nesou přebytečné elektrony, naopak kladně nabitě ionty mají nedostatek elektronů. Jejich elektrický náboj dovoluje, aby roztok vedl elektrický proud. Stejnsměrný proud lze do roztoku zavést dvěma elektrodami. Poté se ionty rozpuštěné soli v roztoku pohybují podle zákonů elektrostatické přitažlivosti. Anionty jsou přitahovány ke kladně nabitě elektrodě, kationty k záporné viz Obrázek 1.1. Ty se na katodě spojují s elektrony katody, přitom vzniká buď elektro neutrální látka, nebo dochází k redukci kationtů a vzniká kationt nižšího mocenství. Záporně nabitě anionty předávají své přebytečné elektrony anodě za vzniku elektroneutrální látky, případně iontu o vyšším mocenství [5].

Příkladem je elektrolýza síranu měďnatého CuSO_4 . Ve vodném roztoku nastává disociace Cu^{++} a SO_4^{--} . Po připojení napětí: Cu^{++} se neutralizují na katodě (vyloučí se jako atomy mědi), SO_4^{--} reagují s anodou a vzniká opět molekula CuSO_4 , neboli K: $\text{Cu}^{++} - 2e \rightarrow \text{Cu}$, A: $\text{SO}_4^{--} + 2e + \text{Cu} \rightarrow \text{CuSO}_4$.

Ubývá materiál anody, je to takzvané užití rozpustné anody. V tomto případě se nemění počet molekul vody ani modré skalice. Pokud by byla anoda z jiného materiálu, než je vylučovaný kovový prvek, ionty SO_4^{--} nereagují s materiálem elektrody, ale s vodou v blízkosti anody za vzniku kyseliny sírové a kyslíku: $2(\text{SO}_4^{--} + 2e + \text{H}_2\text{O}) \rightarrow 2 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{O}_2$.

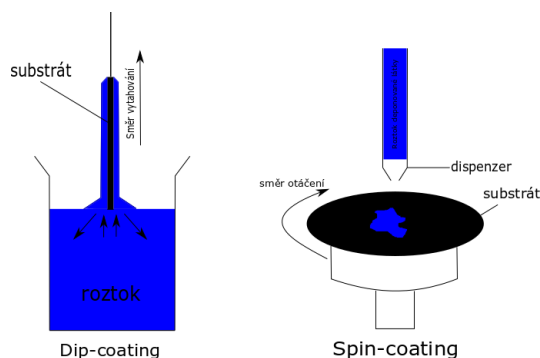
Existuje mnoho různých kovů, které lze použít při pokovování, a proto je pro kvalitu pokovování důležité stanovení správného elektrolytu. Některé elektrolyty jsou kyseliny, zásady, kovové soli nebo roztavené soli. Při výběru typu elektrolytu je třeba mít na paměti korozi, odpor, jas nebo odrazivost, tvrdost, mechanickou pevnost, tažnost a odolnost proti opotřebení [6].



Obrázek 1.1 Proces elektrodepozice

Sol-gel metody

V případě dip-coatingu spočívá tato metoda v ponoření substrátu do roztoku, nebo nanesení roztoku na rotující substrát u spin-coatingu, viz Obrázek 1.2. Sol-gel procesem se nazývá samotná přeměna roztoku v pevnou nanovrstvu, popř. nanoprášek. Využívá se nejčastěji pro přípravu tenkých vrstev keramických kompozitů, jako jsou TiO_2 , ZnO a WO_3 . Připravená suspenze koloidních částic, tzv. sol, se nanese jednou z metod na pevný substrát, kde se přemění na gel po odpaření kapalné složky. Po vysušení a dalším tepelném zpracování vzniká požadovaná tenká vrstva. Základem sol-gel procesu je reakce (hydrolýza) prekursoru, který obsahuje požadovaný prvek, a rozpouštědla. To vnáší do roztoku vodu, potřebnou pro hydrolýzu, při níž dochází k vysrážení částic prekursoru v rozpouštědle. Výslednou tloušťku vrstvy ovlivňují důležité parametry. Jsou u obou metod totožné, a to viskozita solu a rychlost nanášení. U metody dip-coating platí, že čím větší je rychlost vytahování substrátu z roztoku, tím tlustší je výsledná vrstva. U metody spin-coating platí, že s rostoucí rychlostí otáčení substrátu je nanášená vrstva tenčí [7].



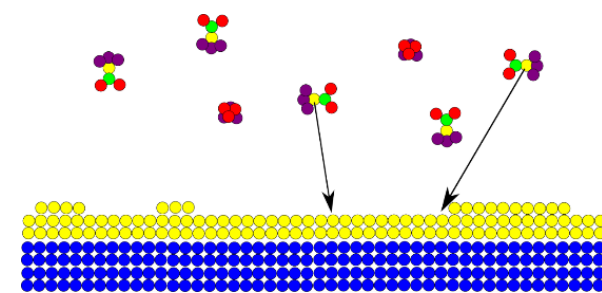
Obrázek 1.2 Princip metod Dip-coating a Spin-coating.

1.2.2 Vakuové metody

Rozdíl mezi PVD a CVD technikami je kromě principu i v pracovní teplotě. CVD techniky jsou energeticky náročnější, protože je potřeba komoru vyhřívat na teploty mezi 750 °C až 1100 °C. PVD techniky pracují při výrazně nižší teplotě a často je tato teplota dána vlastním ohřevem v důsledku depozice, tj. depozicí částic o vysoké energii (naprašování). Pro dosažení dobrých strukturních, morfologických a adhezních vlastností deponované vrstvy je nutná vysoká energie částic, která se dosahuje teplotou nebo plazmou. CVD techniky, využívající asistenci plazmy, používají výrazně nižší teplotu ohřevu, protože potřebnou energii dodá plazma [4].

Chemická depoziční metoda – CVD

U této metody využíváme chemické reakce v plynné fázi mezi více prekurzory, nebo rozkladnou reakci jen jedné látky. Chemická depozice z plynné fáze probíhá za zvýšené teploty. Reakční produkt vytváří následně na substrátu tenkou vrstvu, jak je znázorněno na Obrázku 1.3. Vedlejší produkty chemických procesů jsou odsáty vývěvou, nebo odfouknuty proudem plynu. V polovodičové technologii se tato metoda používá pro epitaxi křemíku nebo germania. Teplotní spády jsou pro Si 1000 °C/950 °C, germanium 300 °C/250 °C. V těchto případech se pro epitaxi používá jodid křemíku, respektive germania [7][8].



Obrázek 1.3 Princip CVD depozice. Převzato z [8].

Fyzikální depoziční metoda – PVD

U tohoto procesu výroby tenkých vrstev, nedochází k chemickým reakcím. Nejčastěji se jedná o kondenzaci par odpařovaného materiálu, případně dopadem částic z terčů, na povrch substrátu. Nejčastěji PVD technologie jsou napařování a naprašování. Naprašování se dále dělí na iontové, reaktivní a magnetronové.

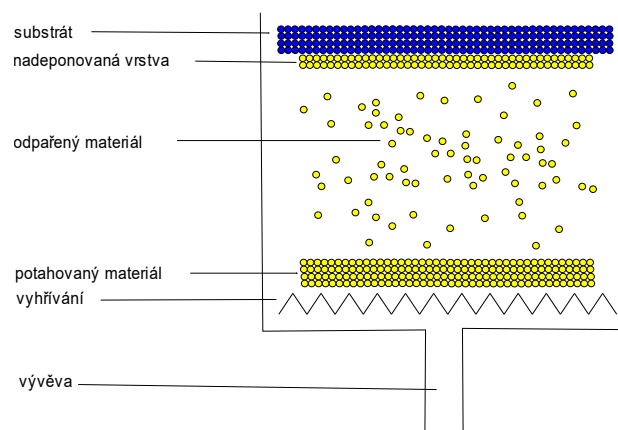
a) Vakuové napařování

Jednu věc mají všechny metody napařování společné, a to bombardování těžkými ionty, obvykle za použití argonu, který nepřetržitě odstraňuje materiál z cílového povrchu, který kondenzuje na povrchu substrátu [9].

Při ohřevu materiálu výparníku (terče) na vysokou teplotu, se zvýší kinetická energie částic v povrchu materiálu na takovou úroveň, až dojde k uvolňování atomů, případně i molekul. Vytvoří se mrak, v jehož prostoru dochází k rovnovážnému tlaku par, tzv. tenzi nasycených par. Pokud není systém v rovnováze a je určité místo chladnější, dochází na

této části ke kondenzaci těchto par a vytváří se tak podmínky pro přenos materiálu z vypařovacího materiálu na chladnější substrát (podložku). Prvně se tvoří ostrůvky, které se slévají až do vytvoření souvislé vrstvy.

Atomy z výparníku se pohybují přímočaře, pokud nedojde ke srážce s jiným atomem nebo molekulou, viz Obrázek 1.4. Aby se docílilo přímočarého pohybu mezi výparníkem a substrátem, na němž chceme vrstvu připravit, musí se zajistit nízká koncentrace cizích částic. Toho se docílí vyčerpáním vzduchu v tomto prostoru zhruba na tlak 10^{-5} torru [2][10].



Obrázek 1.4 Princip vakuového napařování. Převzato z [8]

b) Katodové napařování

Původně se tento způsob nanášení vrstev nazýval „elektrické odpařování“. Je známý asi od roku 1852. V roce 1923 byla prokázána závislost rychlosti napařování na tlaku plynu a tvaru katody. Později, kolem roku 1955, bylo v další etapě prokázáno, že počet atomů vyražených jedním iontem závisí na jeho rychlosti, typu a úhlu dopadu, na materiálu katody a na teplotě tavení. Od tohoto roku je věnována katodovému napařování stále větší pozornost.

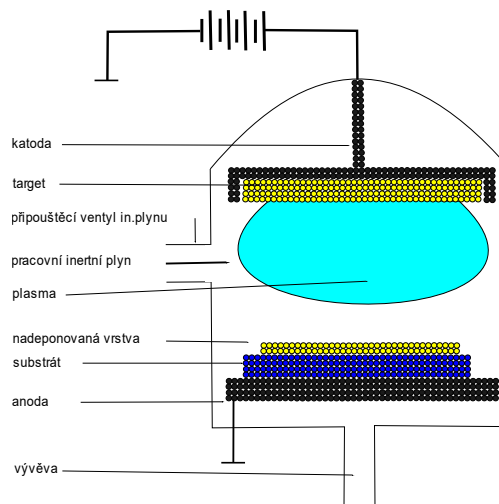
Vlastnosti napařovaných vrstev se mohou ovlivnit tlakem zbytkových plynů, teplotou katody a substrátu, proudovou hustotou a přiloženým napětím. Intenzitu napařování můžeme měnit i plazmou mezi výparníkem a podložkou, kterou můžeme řídit vnějším magnetickým polem [10].

Plazmat může být složen:

- pouze z inertního plynu. Plyn chemicky nereaguje s potahovým materiálem. Deponovaná vrstva má stejné složení, jako má terč. Obvykle se užívá Ar,
- směsí inertního a reaktivního plynu. Vzniká reaktivní depozice vrstev různých chemických sloučenin [3].

Princip zařízení pro napařování je znázorněn na Obrázku 1.5, kde v pracovní komoře za sníženého tlaku, asi 10^{-1} Pa, vzniká mezi katodou a anodou doutnavý výboj. Tento prostor je napuštěn inertním plynem. Katodou se volí materiál, který má být napařen. Anodou je substrát, na němž se bude tvořit vrstva. Potenciál mezi elektrodami není v doutnavém výboji rozložen stejnoměrně, ale tvoří se u katody tzv. katodový spád. Směrem ke katodě jsou unášeny kladné ionty plynu, které vznikly ve výboji, téměř stejnou rychlostí, jakou získaly v prostoru katodového spádu. Urychlené ionty inertního

plynu, které bombardují katodu, uvolňují částice ve formě neutrálních atomů a částečně také iontů usazujících se na okolních tělesech i substrátech umístěných na anodě. Jinými slovy, je-li pevný materiál katody bombardován atomy, ionty nebo molekulami inertního plynu s kinetickou energií převyšující vazební energii atomů odprašovaného materiálu, dochází nejprve k migraci atomů v povrchových vrstvách materiálu katody a následně k vypuzení atomů z tohoto materiálu do plynné fáze [7].



Obrázek 1.5 Vakuový systém katodového naprašování. Převzato z [7].

Hlavními přednostmi naprašování proti napařování jsou:

- absence makročásteček deponovaného kovu,
- přesné přenesení složení targetu do naprašované vrstvy,
- homogenní nanášení vrstev [11].

Naprašovací techniku ovlivňují tyto faktory:

- plocha katody – musí být dvakrát větší, než je plocha vzorku. Často bývá kruhová s chlazením,
- tlak pracovního plynu – proud výboje se zvyšuje s jeho růstem, zvyšuje se i počet iontů,
- čistota terče – zajišťuje i čistotu nanášené vrstvy,
- vzdálenost anoda – katoda – ovlivňuje rovnoměrnost vrstvy [4].

c) Iontové naprašování

Díky této metodě je zajištěna velmi dobrá adheze a vysoká čistota tenké vrstvy. Naprašování probíhá za nízkého tlaku (0,01 Pa) a substrát není v kontaktu s plazmou (nezahřívá se). Na terč z požadovaného materiálu je namířen iontový paprsek o vysoké energii (až tisíce eV). Paprsek vzniká z inertního nebo reaktivního plynu v iontovém zdroji. Částice odprašené z terče se usazují na vhodně umístěný substrát, u kterého je nutné řídit teplotu, tlak a typ nanášených částic, aby nebyl oddělen od zdroje generování plazmy.

Pro vytváření tenkých vrstev je iontový paprsek využíván dvěma způsoby. První možností je odprašování iontovým paprskem – IBDS. Zdroj se nasměruje na terč a odprášený materiál se ukládá ve formě tenké vrstvy na substrát. Druhý případ je depozice s asistencí iontového paprsku – IBAD, tedy že zdroj míří přímo na substrát [12].

d) Reaktivní naprašování

Při použití dobře promísené směsi inertního a reaktivního plynu, zavedené do naprašovacího systému, dojde k procesu reaktivního naprašování. K chemické reakci může dojít na katodě, v průběhu transportu atomů nebo až při povrchu vrstvy, nejčastěji však kombinací uvedených možností. Vytváření vrstev (nitridů, kysličníků, karbidů, sulfidů apod.) zejména při vysokofrekvenčním naprašování probíhá mnohem rychleji než při diodovém naprašování. Zde lze použít jen velmi malého množství reaktivního plynu, aby probíhající reakce při katodě nezmensila rychlost. Vysokofrekvenční pole zabraňuje tvorbě dielektrické vrstvy při katodě během reaktivního naprašování s elektronegativními plyny. Teplota podložky ovlivňuje rychlost růstu vrstev.

Zavedením kladného předpětí na kovové vrstvě oproti anodě lze vrstvu anodizovat bombardováním kyslíkovými ionty v doutnavém výboji. Anodizaci v plynu lze použít pro vytváření kysličníkových vrstev na materiálech Ta, Cr, Si, Ge, Al, Mo a jiných [4].

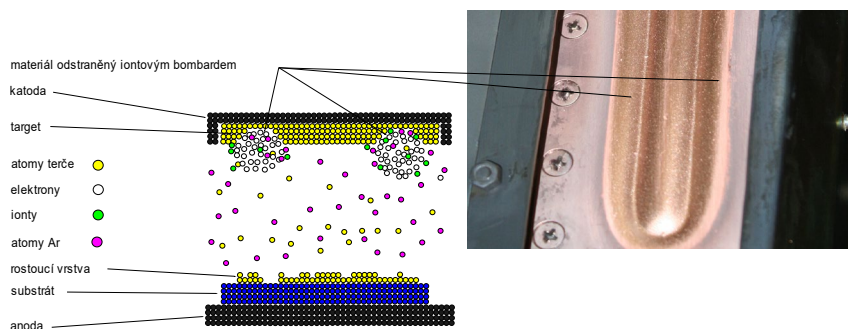
Přítomnost reaktivního plynu způsobuje tzv. otrávení terče, což je pokrytí terče často nevodivou vrstvou reakčního produktu. Se zvyšováním parciálního tlaku se na terči začíná vytvářet sloučenina a mění se depoziční podmínky. Tím se mění poměr počtu atomů kovu k počtu atomů reaktivního plynu. Dochází ke vzniku mikrooblouků [13].

e) Magnetronové naprašování

Některé problémy klasické techniky naprašování, především rychlost nanášení a jeho účinnost, řeší magnetronové naprašování, objevené v roce 1972 [4].

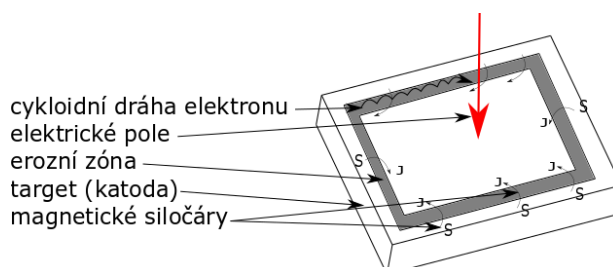
Při procesu magnetronového naprašování je vakuová komora kontinuálně čerpána na vysoké vakuum. Tlak v komoře se pohybuje okolo 1 Pa. V prostoru komory je uchycen terč, který má složení požadovaného naprašovaného materiálu a pod ním je umístěn substrát. Přesné rozměry a geometrie komory nejsou konkrétně definované a mohou se výrazně odlišovat.

Pod materiálem terče, který tvoří katodu, je umístěn chlazený magnet. Do komory se vpouští inertní plyn, nejčastěji argon. Po přivedení napětí mezi katodu (terč) a anodu (substrát) vzniká mezi nimi stejnosměrný doutnavý výboj za přítomnosti magnetického pole kruhové symetrie. Elektrony rotují podél těchto magnetických siločar a cirkulují nad povrchem targetu. Tím se jejich dráha v plynu prodlužuje. Delší doba pobytu elektronu v plynu způsobuje vyšší pravděpodobnost srážky s atomy argonu, ionizaci a tím zápal plazmatu při nižším tlaku, který může být až 100x nižší než u běžného sputteringu. Vyšší ionizace zvyšuje také rychlost depozice. Ionty argonu poté bombardují povrch terče. Pokud je energie iontu cca 3x vyšší než povrchová vazná energie, dojde k uvolnění částic [11]. Ty jsou následně deponovány na substrát (Obrázek 1.6).



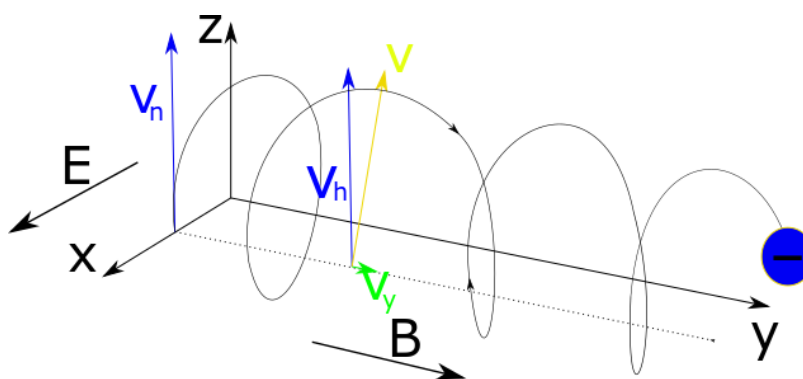
Obrázek 1.6 Vlevo schéma metody magnetronového naprašování [11], s ukázkou použitého měděného targetu vpravo

Jednou z variant magnetronového naprašování je planární uspořádání katody. Tvarované magnetické pole (indukční čáry vystupují z povrchu terče a opět do něho vstupují) způsobuje sekundární emisi elektronů emitovaných z terče, které se pohybují po cykloidních drahách viz Obrázek 1.7 .



Obrázek 1.7 Schématické znázornění elektrického a magnetického pole u planárního uspořádání katody pro magnetronové naprašování. Převzato z [14].

Tímto jevem dochází k prodloužení jejich dráhy (znázorněno na Obrázku 1.8) a tím i k nárustu pravděpodobnosti kolize s atomy inertního plynu. V prostoru působení magnetického pole je intenzivnější odprašování materiálu targetu. Toto odprašování je největší, pokud je magnetické pole kolmé poli elektrickému.



Obrázek 1.8 Pohyb elektronu v elektrickém a magnetickém poli. B – směr magnetického pole, E – směr elektrického pole, v – vektory rychlosti elektronu. Převzato z [14].

U magnetronového naprašování tvoří anodu smyčka z měděné trubky. Nejúčinnější je plazma s velkou hustotou, která je lokalizovaná v těsné blízkosti targetu. Má také

příznivý vliv na teplotu podložky, jež je nižší než u běžného naprašování. Z důvodu zvětšené ionizace stačí s poměrně nízké napětím mezi anodou a katodou, několik set voltů, při tlacích $1,3$ až $2,6 \times 10^{-1}$ Pa. Magnetronová katoda může pracovat při relativně velké hustotě výkonu, pohybující se okolo 16 Wcm^{-2} . U stejnosměrného a vysokofrekvenčního postupu je to 5 až 7 Wcm^{-2} . Typické rychlosti depozice jsou asi desetkrát větší než u zmíněných postupů. Hlavní nevýhodou magnetronového naprašování je nerovnoměrnost depozice, která souvisí s výbojem ve tvaru kruhu. Pro odstranění těchto lokálních nerovnoměrností se zavádí řízený pohyb podložek, obvykle kolmo k delší straně targetu. Při nanášení feromagnetik vzniká problém, že způsobují magnetický zkrat katody [4].

Depozice nevodivých materiálů, jako jsou keramické povlaky, je možná, pokud bude použit střídavý vysokofrekvenční signál vybíjející hromadící se elektrické náboje. Přidáním reaktivního plynu do komory, nejčastěji kyslíku či dusíku, budou při vhodných podmínkách růst na substrátu oxidové, respektive nitridové vrstvy rozprašovaného kovu z targetu. Nevýhodou této metody je složitější nalezení a udržení depozičních podmínek. Naopak výhodami je možnost deponování větší plochy vrstvy při zachování přesného poměru složek, ze kterých byla naprašena.

Výhody magnetronového naprašování:

- vysoká depoziční rychlost (v porovnání s diodovým systémem),
- nízký tlak při vzniku výboje,
- vysoká hustota plazmatu – snížení napětí, zvýšení intenzity rozprašování,
- nízké zatížení substrátu teplotou,
- možnost korekce energie dodávané do vrstvy připojením předpětí na substrát.

Nevýhody magnetronového naprašování:

- nerovnoměrnost depozice související s výbojem ve tvaru kruhu,
- nelze nanášet feromagnetika.

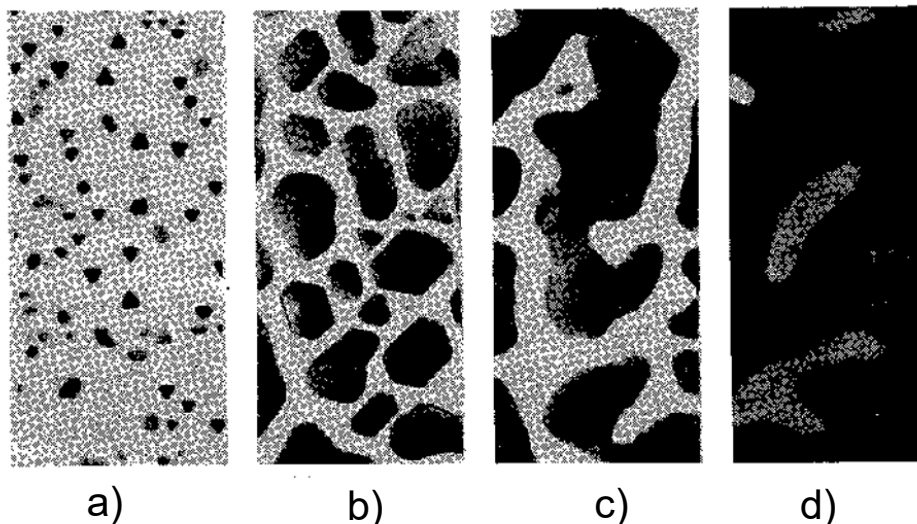
Mechanismus vytváření vrstev

Vznik vrstev je možno rozdělit na určitá stadia, která jsou ve všech případech podobná. Tyto fáze lze označit jako [2]:

1. Vytváření jader neboli nukleace, při němž vznikají malé „zárodky“ statisticky rozložené (až na určité výjimky) po povrchu podložky,
2. růst jader a vytváření větších ostrůvků, které mají často tvar malých krystalků (krystalitů), vytváření prvních jader, srůstání ostrůvků a vytvoření víceméně souvislé sítě prosloupené kanálky, ke kterým se připojují nově nanášené atomy,
3. zaplňování kanálků, tvoří se hranice zrn.

Tento postup vzniku vrstev lze vidět na Obrázku 1.9, pod a) jsou již narostlá jádra, jelikož zárodky jader byly podle [2], v době vzniku snímku pod rozlišovací schopností elektronového mikroskopu.

Velmi důležitý je poznatek, že se po dosažení určité koncentrace jader další dopadající částice připojují, k již existujícím jádrům, popř. k vzniklým ostrůvkům, nevytvářejí jádra nová [2].



Obrázek 1.9 Postup vytváření vrstvy Ag na MoS_2 podle Pashleye [2], a) narostlá jádra, b) růst jader, c) srůstání ostrůvků, d) zaplňování kanálků.

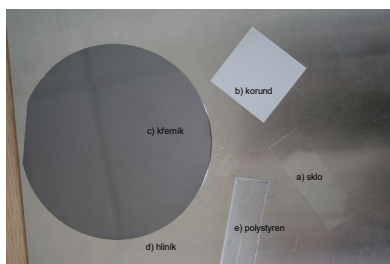
1.3 Podložky

Tenké vrstvy se deponují na funkční či izolační podložky (substráty). Podle účelu použití se na ně kladou různé nároky. Těmi nejdůležitějšími jsou: cena, kvalita povrchu, tepelná a mechanická pevnost, tepelná vodivost, chemické složení, stabilita a minimální pórovitost.

Jako materiál podložek, se nejčastěji používá [10]:

- a) Sklo
Druh: sodnovápenaté, borokřemičité, hlinitokřemičité, tavený křemen.
Vlastnosti: mají kapalinově hladký povrch, dostatečně velkou mechanickou pevnost i tepelnou vodivost.
- b) Polykrystalická keramika
Druh: korundová (Al_2O_3), berylnatá (BeO), sklokeramika.
Vlastnosti: má vynikající mechanickou pevnost, velkou tepelnou vodivost, chemickou stabilitu, odolnost proti náhlým změnám teploty, kvalita povrchu se upravuje dodatečným mechanickým opracováním (broušení, leštění) nebo glazováním (opatření povrchu tenkou vrstvou křemičité skloviny).
- c) Monokrystalické materiály
Křemík, germanium, safír: pro vytváření monokrystalických vrstev nebo technologií epitaxe a difúze.
- d) Kovové materiály
Měď, hliník, stříbro.
- e) Organické materiály
Termoplastické polymery pro nanášení vodivých vrstev na dielektrických tenkých fóliích – polystyren, polypropylen, polykarbonát.

Výběr zástupců substrátů je na Obrázku 1.10.



Obrázek 1.10 podložky pro tenké vrstvy

1.4 Před depoziční přípravou tenkých vrstev

Vhodně zvolenou přípravou povrchu substrátu se zajistí dostatečná přilnavost konečných povlaků, jednolitý vzhled výsledné vrstvy i její dostatečnou odolnost proti korozi či opotřebení.

Přípravy povrchu se nejčastěji dělí do dvou základních skupin operací:

- mechanické povrchové úpravy,
- chemické povrchové úpravy.

Tímto se postupně zajistí dva základní požadavky na před depoziční přípravu:

- požadovaná čistota povrchu,
- zajištění požadované mikrostruktury, respektive mikrogeologie povrchu a jeho kvality.

Volba a provedení předběžných úprav povrchu se volí dle druhu následující povrchové úpravy i jejím použitím. Kvalita povrchu rozhoduje o úspěchu či nezdaru následujících prací. Na Obrázku 1.11 je v levé části patrna odlupující se naprášená vrstva mědi z neočištěného povrchu skelněného substrátu. V druhé polovině je patrna koroze mědi vzniklá zanesením vzdušné vlhkosti pod špatně přilnutou vrstvu téhož substrátu.



Obrázek 1.11 Naprášená vrstva mědi na neočištěný skleněný substrát.

Mechanické úpravy povrchu substrátu

Těmito úpravami se nemění geometrické rozměry předmětu, ale upravuje povrch, aby mu byla dodána požadovaná jakost. Hlavní účely úprav jsou:

- očistit povrch substrátu od nečistot,
- docílit správné smáčivosti povrchu,
- docílit požadovaným vzhledovým vlastnostem,

- zvýšit mechanické vlastnosti povrchu substrátu.

Nejčastěji se používá kartáčování, broušení a tryskání.

a) Kartáčování

Kartáčováním se odstraňují hrubé nečistoty a sjednocuje se povrch. Touto úpravou nelze docílit úplného odstranění nečistot. Používají se kovové i syntetické kartáče.

b) Broušení

Při broušení a leštění se postupně ubírá materiál a tím se odstraňují nerovnosti povrchu. Postup broušení probíhá tak, že je povrch postupně opracováván stále jemnějšími brusnými prostředky. S každým novým procesem se mění směr opracování.

c) Tryskání

Tryskání je založeno na unášení abrazivních částic proudem vzduchu. Používají se kovová i syntetická abraziva, drcené sklo, křemičitý písek i diamantový prášek.

Chemické úpravy povrchu substrátu

Chemické i elektrochemické úpravy povrchu materiálů probíhají mnoha různými technologickými postupy. Povrch kovů určený k dalším úpravám musí být čistý, zbavený okují, rzi apod. Dobrá příprava povrchů kovů je samozřejmým předpokladem všech dalších operací povrchové úpravy. Jsou používány [15]:

- odmašťování,
- moření,
- odrezování,
- chemické a elektrochemické leštění.

a) Odmašťování

Podle použitého rozpouštědla rozeznáváme odmašťování [15]:

- organickými rozpouštědly,
- vodnými alkalickými roztoky, emulzními přípravky (organická rozpouštědla s organickými emulgátory).

Odmašťování alkalickými roztoky je vhodné při znečištění rostlinnými, živočišnými i minerálními mastnotami, mastnými kyselinami a také pro odmašťování hliníku, cínu a zinku. Tato technologie je méně nákladná a z hygienického hlediska méně závadná. Při práci však hrozí nebezpečí poleptání [15].

Emulzní odmašťování je ponořování předmětů do organického rozpouštědla (úzká destilační ropná frakce s vyšším bodem vzplanutí), obsahujícího určité množství organických emulgátorů. Velmi účinné i za normální teploty, vhodné pro odstraňování velkého množství mastnot. Nevýhodou je vznik někdy velmi stabilních emulzí, způsobujících potíže při čištění odpadních vod [15].

b) Moření

Jde o odstraňování korozních produktů z povrchu kovů (okují z tepelného zpracování, rzi z atmosférické koroze) chemickým způsobem – rozpouštěním v kyselinách. K moření

se nejčastěji používá kyselina sírová nebo kyselina chlorovodíková (solná), případně směsi anorganických kyselin [15].

c) Odrezování

K samostatnému odstranění rzi se používají nejčastěji oplachové odrezovače různého chemického složení: kyselina chlorovodíková, kyselina dusičná. Reakcí kyselin s kovy dochází k vývoji vodíku [15].

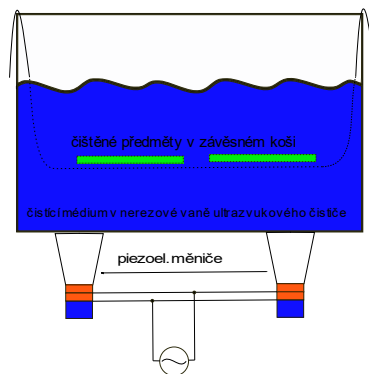
d) Chemické a elektrochemické leštění

Při chemickém leštění se předpokládá, že na hranici kovu a leštící lázně se vytvoří viskózní vrstva. Působením plynů vznikajících při rozpouštění kovů a pohybem lázně se tato vrstvička postupně odplavuje, přičemž se nejprve obnažují vrcholky nerovností, které se pak odleptávají. V prohlubních a pórech kovu se udržuje viskózní kapalina déle a chrání tato místa. Používají se kyseliny dusičná a sírová [15].

Ultrazvukové čištění

Ultrazvukové čištění a odmašťování je šetrný způsob odstraňování organických i neorganických volně vázaných nečistot z povrchů. Při provozu ultrazvukového zdroje vzniká jev zvaný "kavitace", při kterém se v čistícím médiu vytváří miliony mikroskopických bublinek, které vzápětí implodují a uvolněná energie strhává nečistoty z povrchu čistěného předmětu z jeho vnějších i vnitřních částí. Čistěné předměty se ultrazvukem mechanicky nepoškozuje. Ultrazvuková čistička (Obrázek 1.12) spolehlivě vyčistí i členité povrchy [16]. Ultrazvukovým zdrojem může být například piezoelektrický měnič.

Volba čistícího media je jedním z nejdůležitějších faktorů, který ovlivňuje ultrazvukové čištění. Čištění je v podstatě fyzikálně-chemický proces, který probíhá na rozhraní povrchu čistěného předmětu a kapaliny. Kapalina rozpouští nečistoty, resp. s nimi reaguje. Volba čistícího media závisí od druhu nečistoty a materiálu čistěného předmětu. Mnoho čistících procesů je nejefektivnějších při vyšších teplotách, proto některá zařízení jsou vybavena přídavným topením. Chemické roztoky podporují kavitaci, snižují povrchové napětí vody, uvolňují a slučují oddělené nečistoty. Na rozdíl od jiných čistících metod, snižuje spojení chemického prostředku a ultrazvuku délku čistícího procesu. V závislosti na znečištění trvá proces v řádu jednotek minut.



Obrázek 1.12 čištění ultrazvukem

Úprava povrchu plasmou

Plazmová technologie úpravy povrchu materiálu ovlivňuje chemické vlastnosti povrchu, které vyhovují nejen ekonomickým požadavkům, ale také kvalitativním a v neposlední řadě je velice přívětivá k životnímu prostředí. Plazmovými výboji lze také zbavovat povrch nečistot, jako jsou například mastné kyseliny, tuky nebo bakterie. Princip čištění spočívá v bombardování povrchu aktivními ionty a následným odčerpáním nečistot vývěvou [9].

Při magnetronovém čištění plasmou, jsou elektrony urychlovány magnetickým polem a zvyšuje se tak jejich energie. To má za následek mnohem nižší zahřívání čištěného povrchu a malou kontaminaci povrchu částicemi [1].

1.5 Měření tloušťky tenkých vrstev

Tloušťka nanesené vrstvy na substrátu je vzdáleností mezi povrchem vrstvy a povrchem substrátu.

Tloušťka je jedním z nejdůležitějších parametrů tenké vrstvy. Lze říci, že téměř všechny vlastnosti tenké vrstvy závisí na její tloušťce, a může se jich tedy využít k jejímu měření. Různé metody při měření tloušťky téže vrstvy mohou dát rozdílné výsledky [2].

Měření můžeme rozdělit na metody destruktivní a nedestruktivní, podle toho, zda dochází či nedochází k poškození měřeného povrchu či jeho podkladu.

Destruktivní metody měření

Ačkoliv dochází ke zničení měřeného vzorku, využívají se především pro svou přesnost. Do této kategorie patří hlavně mikroskopické metody.

a) Mikroskopická metoda

Při měření optickým mikroskopem směřuje záření ze zdroje na povrch transparentního povlaku, případně u netransparentního povlaku směřuje podél zhotoveného řezu.

Tloušťku vrstvy určíme pomocí rastrů rastrovacího elektronového mikroskopu, který se přepočítává na danou tloušťku, anebo se vyhodnocuje počítačovým softwarem.

b) Interferometrická metoda

Interferometrie je měřicí a kontrolní metoda, která využívá interferenci optických vln k porovnání dvou nebo více optických vlnoploch. Interferometry jsou optické přístroje využívající interferenci světla k zjišťování vzdáleností, tvarů neznámých předmětů, rovinnosti ploch, přímočarosti vedení a podobně [17].

Mezi povrchem povlaku a povrchem podkladu se vytvoří stupeň, který vznikne úplným rozpuštěním povlaku na malé ploše nebo maskováním této plochy před nanášením povlaku. Takto vzniklá výška stupně se měří mnohosvazkovým interferometrem. Metoda umožňuje měření od 0,002 μm do 2 μm [17].

c) Profilometrická metoda

Profilometrická metoda stanoví metodu měření kovového povlaku rozpuštěním povlaku na malé části povrchu (vytvoření stupně) a změřením rozdílu výšky profilometrem. Metoda je vhodná pro měření povlaků v rozsahu 0,01 až 1000 μm na rovinném povrchu [18].

Stupeň se připraví několika metodami:

- povrch povlaku se zamaskuje kromě oblasti, kde má být povlak rozpuštěn,
- malá část povlaku se rozpustí v elektrolytické komůrce ve čtyřech malých kruhových ploškách uvnitř plochy 1 cm^2 ,
- zamaskuje se část povrchu, na kterou se nenanese povlak [18].

d) Kalotest

Při této metodě se do vzorku vybroúsí kulový vrchlík, který se na průmětu jeví jako mezikružší, obvykle se používá rotující, brusnou pastou potřená, ocelová kulička průměru 25 mm. Proměřením průmětu důlku pod mikroskopem lze získat dané rozměry, které umožňují vypočítat tloušťku posuzované vrstvy. Rozsah použití je od 1 do 100 μm s přesností 2–4 %. Mikrostrukturní vyhodnocování kaloty vyžaduje maximální drsnost povrchu povlaku $R_a = 0,4 \mu\text{m}$ nebo záměrné vyleštění vhodné plošky na substrátu před samotnou depozicí. Tuto metodu lze aplikovat i pro měření tlouštěk složek v sendvičových vrstevnatých strukturách [19].

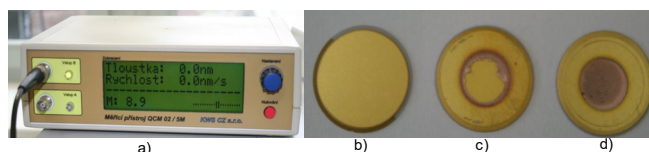
Nedestruktivní metody měření

Jsou také nazývány dotekové. Sonda měřicího přístroje se pohybuje po povrchu vrstvy, nebo je její součástí.

a) Váhové metody

Tyto metody můžeme rozdělit na přímé a nepřímé. U přímé metody, měření pomocí mikrováhy, se deponuje vrstva přímo na vahadlo mikrováhy. To je úměrně vychýlováno s hmotností rostoucí vrstvy.

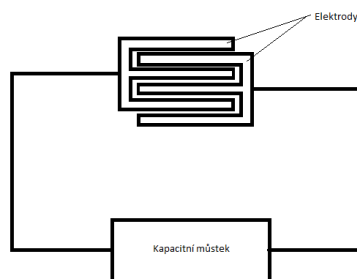
Velmi citlivá je metoda kmitajícího křemene QCM, měřicí přístroj i krystal jsou na Obrázku 1.13. Základem měření QCM je AT-štěpený křemenný krystal, připojený ke zdroji střídavého napětí pomocí dvou elektrod a pokrytý tenkou vrstvou kovu, většinou zlata. Krystal kmitá na své vlastní rezonanční frekvenci. Jestliže na povrch kovové vrstvy na krystalu adsorbují další molekuly, zvýší se jeho hmotnost, a sníží se frekvence střídavého proudu. Tuto změnu lze měřit a s použitím softwaru, lze ze Sauerbreyovy rovnice vypočítat změnu hmotnosti. Jedná se o velmi citlivou metodu umožňující sledovat rozdíly hmotností v řádu nanogramů. Frekvenční změna (Δf) 1 Hz je rovna změně hmotnosti 2,3 ng. Mezi hlavní přednosti této metody patří měření v reálném čase [20].



Obrázek 1.13 měření metodou QCM: a) přístroj pro měření rychlosti nanášení vrstvy a její tloušťky, b), c), d) krystaly QCM zleva: nový, poškozený, nefunkční

b) Elektrické metody

- Odporová metoda: je vhodná například pro měření tloušťky mědi na deskách tištěných spojů, plastových materiálech, ale lze jí použít i pro měření vodivých povlaků na podkladových vodivých materiálech, pokud je jejich odpor rozdílný. Konstantní proud prochází mezi dvěma vnějšími snímači, přiložené napětí se vlivem různého odporu povlaku a podkladového materiálu změní.
- Kapacitní metoda (viz Obrázek 1.14): tloušťku tenkých dielektrických vrstev lze měřit na základě měření jejich kapacity. Při napaření vrstvy na systém elektrod dojde ke změně měřené kapacity. Další možností je měřit kapacitu tak, že se tenká vrstva dielektrika na vodivé podložce pokryje další vrstvou kovu a měří se kapacita takto vzniklého rovinného kondenzátoru [2].
- Měření změny kvality cívky: je-li tenká kovová vrstva umístěna v malé vzdálenosti od cívky, kterou protéká střídavý proud, ztrácí se část energie tím, že se ve vrstvě budí vířivé proudy. Tím se mění kvalita cívky a rezonanční frekvence [2].



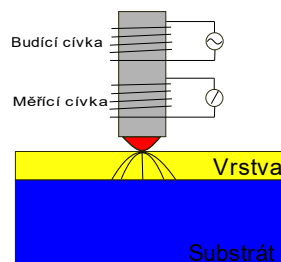
Obrázek 1.14 Kapacitní měření tloušťky vrstvy

c) Magnetické metody

Magnetické metody jsou vhodné pro vrstvy na kovových substrátech. Měření je přípustné pouze na plochem povrchu. Tloušťka vrstvy je měřena na základě vzájemného působení magnetického pole senzoru a kovového substrátu, princip je ukázán na Obrázku 1.15. Tloušťka se stanovuje ze změn magnetického pole. Přístrojem vytvořené magnetické pole může být ovlivněno těmito faktory:

- vlastnostmi substrátu (např. permeabilitou, vodivostí a vlastnostmi získanými jakoukoliv předúpravou),
- tvarem podkladu (rozměry, tloušťkou),
- drsností podkladu,
- další magnetická pole (zbytkový magnetismus substrátu a vnější magnetická pole).

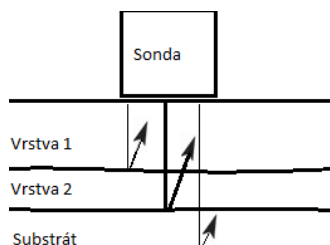
Nejpoužívanější je magneticko-indukční metoda, a to hlavně pro svoji jednoduchost.



Obrázek 1.15 Schéma principu funkce magneticko-indukční sondy

d) Ultrazvuková metoda

Princip spočívá ve vyslání ultrazvukového signálu, který se šíří vrstvou, dokud nenarazí na substrát, jak ukazuje Obrázek 1.16. Odražený signál zaznamená snímač. V současné době je možné měřit až pětivrstvý systém, kdy je má každá vrstva charakteristický samostatný signál. U tohoto systému musí být minimální tloušťka jedné vrstvy 25 μm se zřetelným rozhraním mezi vrstvami.



Obrázek 1.16 Princip ultrazvukové metody

e) Rentgenospektrometrická metoda

U této metody rentgenové záření dopadá na povrch s vrstvou. Měří se intenzita sekundárního záření vysílaného vrstvou nebo vysílaného substrátem a tlumeného vrstvou. Vlnové délky a energie sekundárního záření jsou charakteristické pro každý materiál.

1.6 Elektrické veličiny

Elektrické vlastnosti tenkých vrstev jsou značně závislé na struktuře vrstvy. Rozdílné vlastnosti jsou u souvislé vrstvy v porovnání s vrstvou ostrůvkovou. Také tloušťka vrstvy velmi ovlivňuje tyto vlastnosti.

Měření elektrického odporu

Odpor je elektrická vlastnost materiálu nebo konkrétního přístroje. Jde o veličinu přímo naměřitelnou na určitém vzorku s danou velikostí. Měrný odpor je vlastnost materiálu, která určuje jeho odpor. Je závislý na samotném materiálu, na vnějších parametrech, jako je teplota, ale nezávisí na geometrických vlastnostech vzorku. Rezistivita je jedním z nejdůležitějších elektrických parametrů vůbec. Jde o materiálovou konstantu, která vyjadřující velikost elektrického odporu vodiče případně polovodiče o jednotkovém obsahu průřezu na jednotku délky.

U tenkých vrstev se objevuje výraz plošný odpor neboli odpor na čtverec. Jde o speciální případ rezistivity, který je definovaný pro jednotku tloušťky vrstvy. U tohoto parametru se používá jednotka ohm na čtverec, která ho odlišuje od klasického odporu. R_{\square} je odporem čtvercové vrstvy měřené mezi dvěma protilehlými stranami, jeho jednotku označujeme Ωcm^{-1} . Tento odpor se vypočítá [2]:

$$R_{\square} = \frac{\rho}{t}, \quad (1.1)$$

kde ρ je měrný odpor neboli rezistivita a t tloušťka vrstvy.

Příkladem je slitina Ni a Cr (v poměru 80:20) zvaná nichróm. Kde vrstva 50 nm tlustá má tento odpor $R_{\square}=500 \Omega \square^{-1}$ [2].

Pro měření odporu vrstev můžeme použít metody kontaktní a bezkontaktní. Kontaktní metody se dále mohou dělit na metody přímé a nepřímé.

a) Bezkontaktní metoda měření plošného odporu TV

Tyto přístroje, ukázka jednoho je na Obrázku 1.17, se používají k bezdotykovému testování odporu tenkých vrstev v reálném čase za použití bezdotykové technologie testování pomocí vířivých proudů. Tyto systémy je možné využít také k charakterizaci citlivých povlaků, skrytých nebo zapouzdřených vrstev na sklu, substrátových discích nebo fóliích [21].



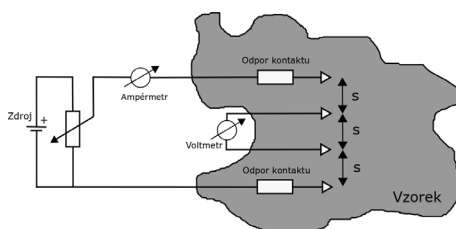
Obrázek 1.17 Ukázka přístroje pro bezkontaktní měření plošného odporu [21].

b) Kontaktní metody

U kontaktních metod hrozí poškození vzorku měřicími hroty. Pro měření lze využít běžné měřicí zařízení. Z toho plyne, že je tato metoda levnější.

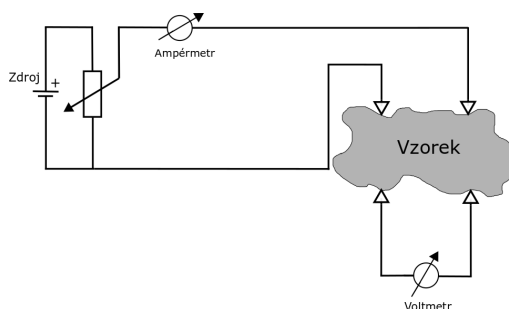
- Přímá metoda měření se nehodí pro měření malých a velmi malých odporů, protože zanáší do měření chybu ve formě odporů měřicích kabelů a vnitřního odporu přístroje.
- Nepřímé metody se využívají dvě. Obě jsou čtyřvodičové.

Metoda čtyřhrotová je znázorněná na Obrázku 1.18. V tomto uspořádání je menší nepřesnost v měření než u přímé metody. Tato metoda se používá při měření malých a velmi malých odporů. Používají se čtyři hroty v jednoduchém symetrickém geometrickém uspořádání. Proud teče do vzorku jedním z vnějších kontaktů, dále přes vzorek a ven ze vzorku skrz druhý kontakt. Mezi těmito kontakty je měřeno napětí v určité vzdálenosti na vzorku. Pro zjednodušení výpočtů je vhodné, aby všechny čtyři hroty byly od sebe stejně vzdálené. Vzdálenost s musí být malá vůči rozměrům vzorku, při tloušťce h to je $h/s > 5$, a vzdálenost nejbližšího hrotu sondy od okraje vzorku větší než $4s$. Dále aby kontakty kov – polovodič byly ohmické [22].



Obrázek 1.18 schematické znázornění čtyřhrotové metody [22].

Metoda van der Pauwa. Pro možnost přesného změření měrného plošného odporu bez potřeby geometrických korekcí, inženýr ze společnosti Philips, L. J. van der Pauw, navrhnul jednoduchý měřicí postup: čtyři konektory se upevní po obvodu vzorku libovolného tvaru, jak je ukázáno na Obrázku 1.19 (čísla 1 až 4). Proud teče dvěma sousedními konektory, např. 1 a 2, napětí se měří mezi konektory 3 a 4 [22]. Tato metoda je pro vzorek destruktivní, konektory se ke vzorku pevně fixují.



Obrázek 1.19 schematické znázornění van der Pauwovy metody [22] .

Měření kapacity

Vlastnosti kapacity velmi ovlivňuje dielektrikum. To se může dělit na polární a nepolární. Polární dielektrika se jsou taková, jehož molekuly mají kladné a záporné náboje rozloženy v objemu tak, že na venek vykazují vlastnosti elektrického dipólu. Ty jsou při absenci vnějšího elektrického pole natočeny chaoticky a výsledná elektrická intenzita všech dipólů je nulová. U nepolárních dielektrik se neprojevují dipólové vlastnosti. Základem dielektrického materiálu je schopnost polarizace po vložení do elektrického pole. Průběh polarizace se liší v závislosti na druhu dielektrika.

Kapacita kondenzátoru udává vztah mezi velikostí elektrického náboje na jeho elektrodách a napětím mezi nimi. Také u kapacity se setkáváme s veličinou na čtverec, konkrétně kapacitou na čtverec C_{\square} , její jednotkou je $\text{pF}\cdot\text{cm}^{-1}$. Tato kapacita se stanovuje [7]:

$$C_{\square} = 8,08854 \cdot \frac{\epsilon_r}{t}, \quad (1.2)$$

kde ϵ_r je permitivita dielektrika a t je tloušťka vrstvy.

1.7 Neelektrické veličiny

Neelektrické vlastnosti jsou důležité z hlediska živostnosti systému substrát vrstva, kdy při špatných vlastnostech může dojít k destrukci systému. Je proto vhodné věnovat těmto vlastnostem velkou pozornost při návrhu i výrobě a jejich následném testování.

Měření adheze

Adheze neboli přilnavost je velikost vazebních sil mezi substrátem a vrstvou. Vazby vznikají iontové, kovové, Van der Waalsovy. Nelze jednoznačně určit, které vazby převládají na rozhraní substrát – vrstva, protože nelze zaručit naprostou chemickou čistotu, ani rovinnost substrátu. Toto rozhraní se tak stává nehomogenní v typu vazeb.

Adheze se měří destruktivními metodami.

- Odtrhová zkouška – spočívá ve stanovení přilnavosti provedením odtrhové zkoušky na jednovrstvém nebo na vícevrstvěmu systému. Měří se minimální napětí v tahu nutné k oddělení nebo roztržení vrstvy ve směru kolmém k podkladu [23]. Zkušební tělísko se pomocí vhodného lepidla nalepí na povrch a lepidlo se nechá zaschnout. Poté se testovací tělísko ořízne speciálním řezákem a na tělísko se nasadí hlava testovacího přístroje. Ten na tělísko vytváří tahovou sílu, až dojde k odtržení tělíska z testovaného povrchu.
- Zkouška smykem – u této zkoušky se mění pouze směr působení odtrhové síly z kolmé na vodorovnou s roztržením vrstva – substrát.
- Mřížková zkouška – hodnotí odolnost vrstvy proti oddělení od substrátu. Vrstva se prořízne pravouhlou mřížkou pronikající až na substrát. Prořez se provádí přesně definovaným nástrojem s jedním nebo více ostřími viz Obrázek 1.20. Při použití nástroje s jedním ostřím je nutné použít distanční šablonu. Ostří se drží kolmo k povrchu testovaného vzorku a je nutné, aby byla zajištěna jeho ostrost. Řez se vede stejnoměrným tlakem. Hodnotí se poté rozrušená vrstva v místě řezu, dle tabulky na Obrázku 1.21, šesti stupni od 0 do 5 [24].



Obrázek 1.20 Příklady řezných nástrojů [24]

Klasifikace	Popis	Vzhled povrchu plochy s mřížkou, na které se vyskytlo odlupování ^a (Příklad pro šest rovnoběžných řezů) ^a
0	Hrany řezů jsou zcela hladké; žádný čtverec mřížky není odloupen	
1	Odloupení malých šupinek povlaku v místech křížení řezů. Zasažená plocha není větší než 5 % plochy mřížky.	
2	Nátěr odloupen podél hran řezů a v místech jejich křížení. Zasažená plocha převyšuje 5 %, ale není větší než 15 % plochy mřížky.	
3	Nátěr částečně nebo zcela odloupen ve velkých pásech podél hran řezů a/nebo částečně nebo zcela odloupen na různých částech čtverců. Zasažená plocha převyšuje 15 %, ale není větší než 35 % plochy mřížky.	
4	Nátěr odloupen ve velkých pásech podél hran řezů a/nebo se některé čtverce částečně nebo zcela odloupily. Zasažená plocha převyšuje 35 %, ale není větší než 65 % plochy mřížky.	
5	Jakýkoli rozsah odloupení, který nelze klasifikovat ani stupněm 4.	—

^a Obrázky znázorňují příklady mřížek v rámci jednotlivých klasifikačních stupňů. Uvedené procentuální podíly jsou založeny na vizuálním dojmu z obrázků a při digitálním zpracování obrazu nemusí být nutné dosaženy stejné podíly.

Obrázek 1.21 Klasifikace výsledků mřížkových zkoušek [24].

- d) Zkouška ohybem – u této zkoušky je vzorek ohýbán přes kruhový předmět, nejčastěji válec. Sledují se změny povrchu.
- e) Vrypová zkouška – při této zkoušce dochází k pohybu hrotu indentoru po povrchu vzorku s narůstající zatěžovací silou. Na rozhraní vrstva – substrát se zvyšuje tenze způsobující postupné porušení integrity vzorku. Při kritickém zatížení dojde k oddělení vrstvy od substrátu, velikost tohoto zatížení je poté měrou adheze.

Určení vnitřního pnutí

Napětí vzniká ve vrstvě zejména po jejím vytvoření, případně po jejím tepelném zpracování. Dochází ke změně hustoty odstraněním nadpočetných vakancí, dislokací, případně ke změně chemické struktury. Velmi často dochází ke vzniku pnutí vlivem rozdílného koeficientu teplotní roztažnosti substrátu a nadeponované vrstvy. Rozlišují se dvě formy pnutí:

- a) tahové – pokud by, při tomto pnutí, byla vrstva teoreticky oddělena od substrátu, došlo by ke stažení vrstvy. Vysoké tahové napětí zapříčiňuje vznik trhlin.
- b) tlakové – naopak u tohoto napětí by se vrstva po oddělení od substrátu roztáhla. U tohoto napětí je tendence k delaminaci vrstvy.

Vnitřní pnutí se většinou zjišťuje destruktivními metodami. Jsou to například odvrtávací metoda, kdy se do vrstvy vyvrtá malý otvor způsobující uvolnění zbytkových napětí a následně se měří deformace uvolněním způsobené. Další variantou je vtisková metoda, kdy po vtisku indentoru se měří velikost prasklin v okolí vrypu. Nedestruktivní metodou je například neutronová difrakce vnitřních napětí. Jedná se o modifikaci rentgenové difrakční techniky, kdy se využívá metodika rozptylu tepelných neutronů [25].

Měření tvrdosti

U tenkých vrstev by bylo vhodnější použití pojmu mikrotvrdost. Je to jedna ze základních vlastností systému. V principu se jedná o odpor materiálu proti plastické deformaci vyvolané zatížením indentoru v kolmém směru. U mikrotvrdosti se toto zatížení pohybuje do 2 N. Při použití Vickersova jehlanu odpovídá hloubka průniku indentoru přibližně jedné sedmině úhlopříčky vytvořeného vtisku. Před zkouškou je vhodné stanovit maximální zatížení s ohledem na materiál substrátu. Mohlo by dojít k ovlivnění měření vlivem vtisku do substrátu [26].

Chemická stálost a stabilita v prostředí

Chemická stálost je schopnost odolávat v čase chemickému působení prostředí, kterým může být okolní atmosféra, voda nebo roztoky či taveniny nejrůznějšího chemického složení. Při návrhu výrobku se musí vzít v potaz, jakému prostředí bude vystaven. Stupeň chemické odolnosti vrstvy a tím i její použitelnosti za různých podmínek, jsou dány chemickým složením vrstvy, kvalitou nebo úpravou jejího povrchu

a podmínkami, za nichž ke vzájemnému působení dochází. Zkouška se provádí namáčením výrobku v dané chemické látce.

Test stability může probíhat v reálném čase nebo za akcelerovaných podmínek. Stabilita v prostředí by mohla být simulována zkouškou korozní odolnosti v solné mlze, kdy se cyklicky střídá fáze solné mlhy, sušení a fáze odvlhčení. Solná mlha může kromě chloridu sodného také přidávek chloridu měďnatého. Případně může být použit chlorid sodný okyselený kyselinou octovou.

1.8 Maskování

Tvorba motivu na substrátu probíhá zakrytím míst (maskováním), která nemají být nadeponována. Toto lze učinit maskou z fotorezistu nebo plastovou případně kovovou šablonou.

- a) Šablony – šablona se zhotovuje nejčastěji z kovové fólie, vyrobené z fosforového bronzu, niklu či nerez oceli. Příslušný motiv je do šablony vytvořen leptáním, aditivně či laserově [27]. Šablona je poté přiložena přímo na substrát. Nedokonalostí této metody je nedostatečná přilnavost k povrchu a hrozící podprášení deponovaného materiálu na zastíněná místa.
- b) Masky – jsou tvořeny fotorezistem. Motiv je v nich vytvořen fotolitograficky [27].

Fotolitografie

Motiv je přenášen přímým osvitem přes předlohu na vrstvu pokrytou fotocitlivým materiálem. K osvitu je většinou použito ultrafialové světlo. Podle vlnové délky je možné zdroje záření dělit na měkké, tvrdé a extrémně tvrdé. Zde je vlnová délka pod 200 nm. Fotolitografie je dotyková (předloha je přiložena přímo na rezist, Obrázek 1.22) nebo bezdotyková. Bezdotyková projekce využívá soustavu čoček. Tímto uspořádáním je možné dosáhnout mnohem většího rozlišení v porovnání s maskou. Dalším způsobem vytvoření motivu do fotorezistu je metoda Laser Direct Imaging, kdy se obraz přímo vykresluje laserovým paprskem bez použití předloh [7].

Fotorezist

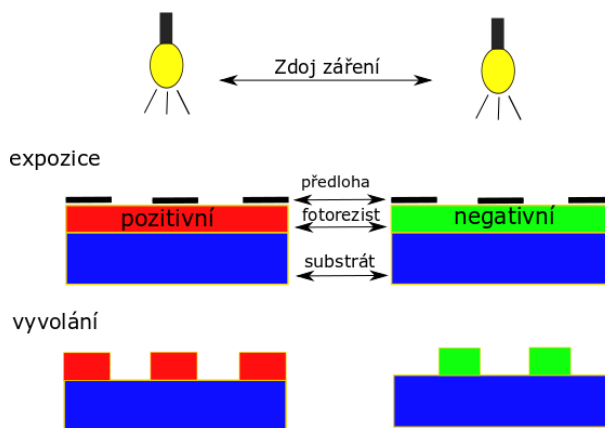
Fotorezist je látka citlivá na světlo, která vlivem světla určité vlnové délky změní své vlastnosti (rozpadne se, nebo se vytvrdí). Podle tohoto kritéria se rozlišuje pozitivní a negativní fotorezist.

- a) Pozitivní fotorezist – po vystavení UV záření dochází k narušení exponovaných částí fotorezistu, které tím ztratí odolnost vůči vývojce a dochází k odplavení [27].
- b) Negativní fotorezist – exponované části polymerují a vytvrdnou, stávají se tak odolné vývojce. K odplavení dochází u neosvícených částí [27].

Fotorezisty se také dělí na suché filmy, které jsou laminovány na substrát a tekuté. Ty jsou nanášeny metodou spin-coating, zmiňované v metodě sol-gel. Této metody se

využívá hlavně k maskování křemíkových waferů [7]. Při laminaci suchých filmů je nutné dodržet teplotu přehřevu u linačního procesu, rychlost posuvu a přítlak [27].

Po nanesení fotorezistivní vrstvy je dalším krokem expozice. Po exponování následuje vyvolání v 1% roztoku uhličitanu sodného s pracovní teplotou 30–35 °C [27].



Obrázek 1.22 Fotolitografie u pozitivního a negativního fotorezistu [27].

2. PRAKTICKÁ ČÁST

2.1 Použité substráty

Pro studium vytváření tenkých vrstev na různých substrátech bylo zvoleno po jednom zástupci z každé skupiny zmíněné v kapitole 1.3 Podložky.

Zástupce skla bylo běžné mikroskopické podložní sklo. Nevýhodou tohoto druhu vzorku je jeho značný průhyb v měřítku tenkých vrstev. Výhodou je snadná dostupnost v laboratořích, přesné geometrické rozměry. Depozici vrstev na skleněný substrát lze použít v senzorové technice, telekomunikací a mnoha dalších odvětvích.

Ze skupiny polykrystalické keramiky byl vybrán zástupce korund, respektive korundová keramika, která se v elektronice používá pro substrát tlustovrstvých technologií. Má výborné tepelné vlastnosti a vynikající přilnavost, nízkou tepelnou roztažnost. Nevýhodou je horší opracovatelnost vzhledem k její tvrdosti.

Z monokrystalických materiálů byl zvolen křemíkový wafer. Tenké vrstvy se mimo jiné využívají v aplikacích mikroprocesorové techniky. Při dělení křemíkových vzorků je dobré dbát na krystalografickou orientaci monokrystalu a využít pro směr lomu Millerovy indexy.

U kovových materiálů bylo rozhodnuto pro hliníkový plech. Hliník se používá na materiály chladičů. Ve spojení s tenkou vrstvou by mohlo být dosaženo větší výkonové zatížitelnosti systému.

Organické materiály zastupoval polystyren, jedná se čirou, tvrdou látku ze skupiny termoplastů. Používá se ve vysokofrekvenční technice.

Mikroskopické podložní sklo

Nejdůležitější surovinou při výrobě skla je písek, který je zdrojem SiO_2 . Pro snížení tavicí teploty se často přidává kalcinovaná soda (Na_2CO_3) - zdroj oxidu sodného, přidávají se i skleněné střepy [28].

V průběhu tavení se oxid sodný stává součástí taveniny za uvolňování oxidu uhličitého. Coby čerivo a oxidační činidlo se přidává síran sodný. Ten je sekundárním zdrojem oxidu sodného, který se včleňuje do skla. Následně tavenina uvolňuje plynné oxidy síry. Uhličitan draselný (K_2CO_3) je tavivem a používá se v některých procesech, zvláště u speciálního skla. Do taveniny se začleňuje oxid draselný, emituje se oxid uhličitý. Přidáním dalších oxidů se zlepšuje tvrdost a chemická odolnost. Tento účinek má oxid vápenatý (CaO) přidávaný ve formě vápence nebo křídly – uhličitan vápenatý (CaCO_3). Muže se přidat také formou dolomitu, který slučuje jak uhličitan vápenatý, tak uhličitan hořečnatý (MgCO_3). Pro zlepšení chemické odolnosti a ke zvýšení viskozity za nižších teplot se přidává oxid hlinitý (Al_2O_3). Obvykle přidáván formou nerostu nefelínu ($\text{Na}_2\text{O-K}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$) [28]. Prvky obsažené v sodnodraselném skle jsou v Tabulce 2.1.

Pro některé výrobky je důležité přidání oxidu boritého (B_2O_3), zvláště u speciálního skla (boritokřemičité skla) a pro skleněná vlákna (skleněná vlna a nekonečné vlákno). Jeho nejdůležitějším účinkem je snížení koeficientu roztažnosti skla, ve vláknech se rovněž mění viskozita, což podporuje rozvlákňování a zvyšuje odolnost vůči vodě [28].

Sodnodraselné sklo má vyšší teplotní roztažnost, jeho další fyzikální vlastnosti jsou v Tabulce 2.2. Toto sklo je určeno pro výrobky, které nejsou extrémně teplotně namáhány. Z této skloviny se vyrábějí např. zkumavky pro jednorázové použití, pipety, zásobní a reagenční láhve, krabice na vatu apod. Sodnodraselné sklo není dostatečně chemicky odolné proti dlouhodobějšímu skladování kyselých či zásaditých roztoků [28].

Tabulka 2.1 Chemické složení sodnodraselného skla [29].

Oxid	Procentuální zastoupení v objemu
SiO_2	70 %
$Na_2O + K_2O$	14 %
Al_2O_3	4 %
Ba_2O_3	1 %
$CaO + MgO$	7 %
BaO	3 %

Tabulka 2.2 Fyzikální a chemické vlastnosti sodnodraselného skla [29].

Vlastnost	Hodnota
TKE dle ISO 7991 20/300 °C	$8.6 \cdot 10^{-6} K^{-1}$
Hustota při 20 °C	$2.52 g \cdot cm^{-3}$
Teplota měknutí	730 °C
Odolnost vodě při 98 °C	HGB 3

Podložní skla jsou v rozměru 26 x 76 mm a tloušťce 1 mm. Jejich hrany se zabrušují pod úhlem 90 °, aby nedošlo k poranění pořezáním.

Korundová keramika

Oxid hlinitý Al_2O_3 – je jedním z nejdůležitějších a nejvíce v průmyslu používaným keramickým materiálem. Má bohatou polymorfii, v konstrukční i tradiční keramice se používá především polymorfní $\alpha - Al_2O_3$ (korund) [30].

Oxid hlinitý tvoří základní složkou při výrobě keramiky, jeho obsah z použitých surovin je 96 %, zbylé 4 % tvoří přísady zlepšující vlastnosti vypálené keramiky a zpracovatelnost keramické suspenze. Její příprava probíhá v kulových mlýnech, kde dochází k homogenizaci oxidu hlinitého s přísadami. Vytváří se hmota, která je dále zpracovávána na licí lince a pomalu zasušena. Vzniká syrová keramická fólie, ze které jsou za syrova razicími lisami naraženy keramické substráty nebo již výrobky složitějších tvarů. Tyto výrobky jsou posléze posypány jemným korundovým práškem na prosypové lince. Prášek zabraňuje slepení vypalovaných výrobků při sintrovacím výpalu. Další technologickou operací je výpal podle přesně definovaného teplotního profilu. Maximální

vypalovací teplota se pohybuje okolo 1580 °C. Vzniká keramický substrát unikátních vlastností (Tabulka 2.3), vhodný pro celou řadu aplikací v elektrotechnice [31].

Tabulka 2.3 fyzikální vlastnosti Al_2O_3 [30].

Vlastnost	Hodnota
Hustota	$3.5\text{--}4.0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$
Bod tání	2054 °C
Pevnost v ohybu	150-500 MPa
Lomová houževnatost	$3.5\text{--}4.5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$
Modul pružnosti	200-400 MPa

Substráty z korundové keramiky se vyrábí v rozměrech 50 x 50 mm nebo násobcích až do 200 x 200 mm v tloušťkách 0,1 – 1,5 mm [31]. Použité substráty jsou čtverce s hranou délky 50 mm, síly 0,65 mm.

Křemíkový wafer

Je základní stavební prvek ve výrobě polovodičových součástek. Křemík polovodičové čistoty 99,9999 % (6 N) až 99,999999999 % (9 N) je získáván z křemíku metalurgické čistoty 98 % převáděného při 300 °C na plyn trichlorsilan HSiCl_3 za použití $\text{Si} + 3 \text{HCl} \rightarrow \text{HSiCl}_3 + \text{H}_2$. Tímto je odstraněna velká část nečistot. Trichlorsilan je velmi toxický a na vzduchu vznětlivý. Dále je v autoklávu přeměněn na polykrystalický křemík pomocí pyrolytické reakce. Ten je v dalším procesu zahříván na 1100 °C. Pomocí reakce $\text{HSiCl}_3 + \text{H}_2 \rightarrow \text{Si} + 3 \text{HCl}$ na vložené křemíkové tyči narůstá polykrystalický křemík požadované čistoty. Tento materiál, čistoty 9 N, slouží jako základní surovina pro Czochralského metodu. Křemík se rozpouští v kelímku z křemenného skla, podepřeného grafitovým kelímkem umístěným v tavicí peci. Do vzniklé taveniny se vnoří zárodek. Jeho orientace bude orientací pro celý vznikající ingot. Zárodek se pomalu vytahuje z taveniny za dodržení stanovené rotace kolem svislé osy. Vzniklý ingot se nechává postupně zchladnout [32].

Následujícím procesem je dělení na wafery, jejich lapování, při kterém se odstraní praskliny vzniklé řezáním. Následně probíhá leptání kyselinou dusičnou pro dosažení maximální hladkosti a leštění povrchu. Po leštění následuje ještě chemické očištění zbavující povrch zbytků leštidla [32]. Fyzikální vlastnosti křemíku jsou shrnuty v Tabulce 2.4.

Tabulka 2.4 Fyzikální vlastnosti křemíku [33].

Vlastnost	Hodnota
Hustota při 20°C	$2.33 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$
Měrný odpor intrinzického materiálu při 300 K	$2.3\cdot 10^9 \Omega\text{mm}^2\text{m}^{-1}$
Teplota tání	1415 °C
Měrná tepelná vodivost	$8.4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Měrné teplo	$0.75 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
TKE	$42\cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$

Křemíkové wafery se vyrábí v průměrech 2, 4, 6, 8 a nyní i 12 palců. Byl použit wafer průměru 6 palců (150 mm) a tloušťky 0,65 mm

Hliník

Hliník je nejrozšířenější kov a je třetí nejrozšířenější prvek zemské kůry. Obsah hliníku v ní činí 7,47 % hmoty. Výroba hliníku se od roku 1886 provádí elektrolytickým rozkladem oxidu hlinitého rozpuštěného v roztaveném kryolitu [34].

Bayerův způsob přípravy oxidu hlinitého spočívá v rozkladu mletého, žíhaného bauxitu hydroxidem sodným za zvýšeného tlaku a teploty v autoklávech různé konstrukce. Vzniklý roztok hlinitanu sodného se filtrací zbaví nečistot ($\text{Fe}(\text{OH})_2$, hydratovaný SiO_2), podrobí hydrolýze a rozkladu pomocí oxidu uhličitého, následně se kalcinuje na oxid hlinitý [34].

Vedlejším produktem Bayerova způsobu je soda, která se kaustifikuje vápnem za vzniku hydroxidu sodného, ten je vrácen zpět na začátek procesu. Praktické využití hliníku i jeho slitin je velmi rozmanité. Hliník je v čistém stavu velmi reaktivní, na vzduchu se však rychle pokryje tenkou vrstvičkou oxidu Al_2O_3 , která chrání kov před další oxidací [34]. Vlastnosti hliníku shrnuje Tabulka 2.5.

Největší množství, více než 40 % celosvětové produkce, hliníku se spotřebovává na výrobu plechovek na nápoje, 24 % hliníku spotřebuje automobilový průmysl, 12 % hliníku najde uplatnění v elektrotechnice, 8 % se využívá ve stavebnictví. Pouhá 3 % vyrobeného hliníku se využívá v leteckém průmyslu, to je stejné množství, jaké se spotřebuje k výrobě hliníkového nádobí. Hliník využívající se k barvení dortů a cukrovinek nese označení potravinářské barvivo E 173 [34].

Vstupním materiálem pro výrobu desek je litý blok, který se dále tepelně zpracovává, aby se materiál zbavil vnitřního pnutí. Blok se řeže anebo válcuje na požadovanou tloušťku. Při výrobě frézovaných desek se blok nařeže, oboustranně se ofrézuje povrch na požadovanou tloušťku s přesností od 0,2 mm. Nakonec je hliníková deska potažena ochrannou polyethylenovou folií [34].

Tabulka 2.5 Fyzikální vlastnosti hliníku [34].

Vlastnost	Hodnoty
Hustota	$2.6989 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$
Teplota tání	$660.4 \text{ }^\circ\text{C}$
Tepelná vodivost při $20 \text{ }^\circ\text{C}$	$235 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Elektrická vodivost při $20 \text{ }^\circ\text{C}$	$2.6\cdot 10^{-8} \Omega\cdot\text{m}$
Elektrický odpor u čistoty 99.8 % a $20 \text{ }^\circ\text{C}$	$26.55 \text{ n}\Omega\cdot\text{m}$
Teplota supravodivosti	$1.2 \text{ }^\circ\text{K}$
Pevnost v tahu	$\geq 100 \text{ MPa}$

Hliníkové výrobky jsou rozličných tvarů od plechů přes konstrukční prvky po odlitky. V tomto případě byla zakoupena tabule o rozměru 250 x 500 mm a tloušťky 0,8 mm, která byla následně nadělena na rozměr odpovídající mikroskopickému podložnímu sklu.

Polystyren

Je to třetí nejvíce vyráběný plast. Vzniká polymerací vinylbenzenu (styrenu) dodávaným spolu s pomocnými látkami do reaktoru. Reakční řada obvykle zahrnuje kontinuálně míchaný reaktor nebo průtočný reaktor s pístovým tokem. Styren sám o sobě vystupuje jako reakční rozpouštědlo. Přidáním ethylbenzenu, až do koncentrace 10 %, lze lépe kontrolovat reakci. Teplota reakce se pohybuje v rozmezí 110 a 180 °C. Na konci reakční řady, dosahuje konverze styrenu 60-90 %, vztaženo na pevný výsledný produkt. Směs dále prochází do odplynovací části jednoho nebo dvou odplyňovačů, kde se odlučuje polymer od nezreagovaných částic. Odplynění probíhá při teplotě 220-260 °C, za vakua do 0,40 bar. Roztavený polymer je dopraven do barvící hlavy, aby se získaly struny se slabým modrým odstínem, které jsou následně v granulátoru sekány. Po usušení jsou granule dopravníky uloženy v zásobnících pro balení [35]. Polystyrénové fyzikální vlastnosti jsou uvedeny níže v Tabulce 2.6.

Tabulka 2.6 Fyzikální vlastnosti polystyrenu [36].

Vlastnost	Hodnoty
Hustota	0.96 -1.04 g·cm ⁻³
Teplota tání	240 °C
Tepelná vodivost	0.033 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Diel. konstanta při 1KHz – 1 GHz	2.6
Index lomu	1.6
Reakce na vodu	Nerozpustný
Elektrický průraz při	50 kV·mm ⁻¹

Polystyren je čirý, tvrdý a křehký termoplast. Vyrábějí se z něj různé obaly a jednorázové nádoby, jako jsou hrnky, zkumavky i Petriho misky. I zde byla zakoupena tabule o rozměru 250 x 500 mm, ovšem tloušťky 2 mm. Nadělena na stejný rozměr odpovídající mikroskopickému podložnímu sklu.

2.2 Seznámení s magnetronovým naprašovacím zařízením

Použité magnetronové naprašovací zařízení NP – 12 je prototyp vyrobený firmou KWS CZ s.r.o. Je rozděleno na pracovní komoru kvádrového tvaru (Obrázek 2.2 figure 1) a ovládací panel (Obrázek 2.2 fig.2). Obě části jsou umístěny na společné základně ukrývající technologii zařízení (Obrázek 2.2 fig.3). Na čelní straně je hlavní vypínač (Obrázek 2.2 fig.4)

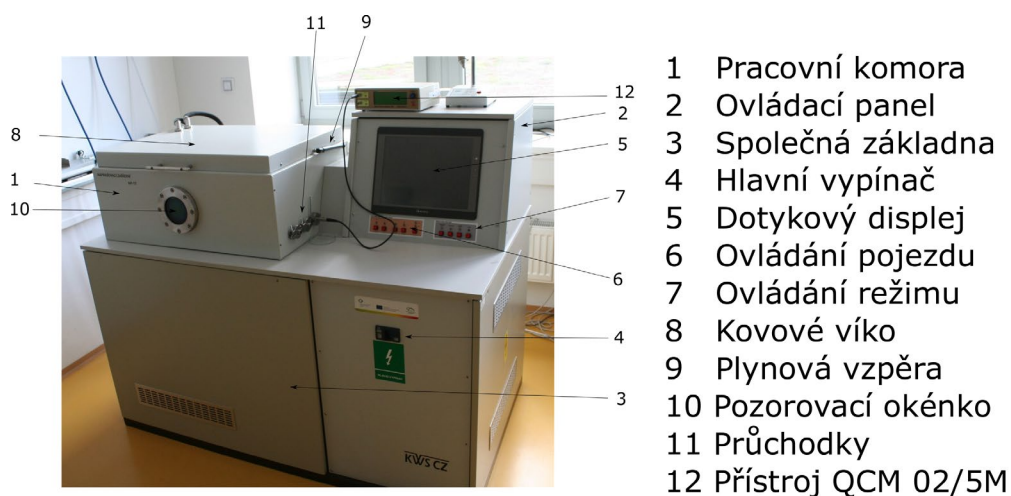
Zařízení je napojeno na centrální rozvod tlakového vzduchu v budově, dále na láhev s argonem, dusíkovou láhev a kyslíkovou láhev. Tyto tlakové láhve jsou umístěny ve vedlejší laboratoři. Před použitím je nutné dané láhve otevřít a také otevřít ventily v místnosti s naprašovačkou. Na Obrázku 2.1 jsou vidět ovládací ventily přírodních plynů v pořadí zleva vzduch, argon, dusík a kyslík.



Obrázek 2.1 Ventily v místnosti s naprašovačkou

Ovládací panel je vybaven dotykovým displejem (Obrázek 2.2 fig.5) a sadou mechanických tlačítek sloužící pro ruční ovládání pojezdu magnetronové hlavice (Obrázek 2.2 fig.6) a základní ovládání režimu stroje (Obrázek 2.2 fig.7). Systém pro ovládání zařízení má několik podoken pro nastavení režimu depozice. Volí se zde pracovní tlak vakua, průtočnost vpouštěného plynu. Na displeji je možné sledovat průběh vakua v reálném čase. V dalším okně se volí typ naprašování. PVD I., slouží pro magnetronové naprašování, PVD II. pro reaktivní naprašování. Dále se zde vybírá jeden ze tří targetu a nominální hodnotu ionizace. V tomto okně je možnost sledovat výkon naprašování a odražený výkon během depozice tenké vrstvy, také se zde spouští proces depozice.

Pracovní komora je seshora uzavřena kovovým víkem (Obrázek 2.2 fig.8). Víku, značné hmotnosti, pomáhají při otevírání plynové vzpěry umístěné po vnějších stranách pracovní komory (Obrázek 2.2 fig.9). Na čelní straně je pozorovací okénko (Obrázek 2.2 fig.10), kterým lze sledovat proces přejezdu magnetronové hlavice, zapálení plazmy a do jisté míry sledovat i uložené vzorky. Pozorování vzorků je ztíženo absencí světelného zdroje. Jediný přísvit poskytuje zapálená plazma. Ze strany ovládacího panelu je komora opatřena třemi průchodkami (Obrázek 2.2 fig.11), které umožňují popojit vnější zařízení se zařízeními umístěnými uvnitř. Jedna průchodka je využita pro externí měřicí přístroj QCM 02 / 5M (Obrázek 2.2 fig.12). Tento přístroj za pomoci senzoru QCM uvnitř komory (Obrázek 2.3 fig.6) vyhodnocuje rychlost depozice a tloušťku nanesené vrstvy. Zadní strana nese rotační i turbomolekulární vývěvu zajišťující evakuaci pracovního prostoru komory a přepouštěcí ventily.

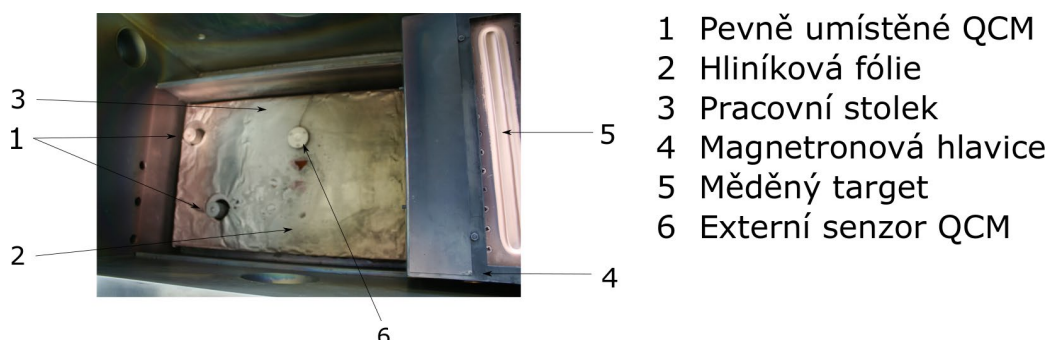


Obrázek 2.2 naprašovací zařízení NP -12

Vnitřní část pracovní komory je rozdělena do tří sekcí. Obě krajní polohy jsou startovací zóny. Jedině v nich dochází k prvotnímu zapálení plazmy. Jsou zde pevně umístěny měřicí krystaly QCM (Obrázek 2.3 fig.1) sloužící pro nastavení depozičního procesu, dva na každé straně. Prostředí sekce s umístěným pracovním stolem je největší (Obrázek 2.3 fig.3), ten je galvanicky oddělen od zbytku komory. Dovoluje použít substrát o maximální velikosti 250 x 450 mm. Stolek může být vyhříván, nebo naopak chlazen, dle zvoleného postupu depozice. Povrch má pokryt tenkou hliníkovou fólií (Obrázek 2.3 fig.2), pro snadnější čištění vnitřního prostoru komory, kdy se tato fólie odstraní a je nahrazena novou.

Nad pracovním stolem se nachází pohyblivá magnetronová hlavice (Obrázek 2.3 fig.4) s pojezdem v horizontální rovině. Rotační hlavice umožňuje během depozice vyměnit stávající target (Obrázek 2.3 fig.5) za jiný, bez nutnosti zavzdušnění komory. Rotace probíhá z prostorových důvodů mimo startovací zóny. Během nanášení je možné vybírat až ze tří předem připravených targetů. Na jedné straně hlavice jsou umístěny vedle sebe dva targety, třetí je na protilehlé.

Na vnější straně budovy se nachází chladicí zařízení, spojené potrubím s naprašovacím zařízením. Tato chladicí jednotka slouží primárně pro ochlazování targetu na požadovanou teplotu. Další možnost využití je pro ochlazení pracovního stolu, potažmo celé komory.



Obrázek 2.3 Pracovní komora s měděným targetem vpravo

Spuštění zařízení

Po otevření kohoutů s požadovanými plyny a zapnutí hlavního vypínače, musí být zadáno vstupní heslo uživatele. Při každém odstavení stroje bývá pracovní komora evakuována, aby nedocházelo ke kontaminaci vnitřního prostoru atmosférickým vzduchem. Proto se před prvotním otevření víka komora zavzdušňuje. K tomu slouží příslušné tlačítko na ovládacím panelu a tlakový vzduch z centrálního rozvodu. Víko lze nadzvednout při zavzdušnění komory na hodnotu tlaku okolní atmosféry. Po umístění vzorků do požadované pozice na pracovní stolek, je nutné opět víko uzavřít. Následně je možné spustit proces evakuace tlačítkem „Start“. Tento proces trvá více jak 60 minut, dle stupně požadovaného vakua. Dosáhne-li se požadované hodnoty, následuje režim vpuštění plynu v záložce „Vakuum a plyny“. Magnetronové naprašování probíhá v inertní atmosféře argonu. Pro volbu oxidových vrstev se připouští ještě požadované množství kyslíku. Při výrobě nitridových vrstev dusík. Poté se volí funkce „Regulace vakua“. Tento proces je možné sledovat na displeji. Dochází k prvotnímu překmitu tlaku plynu a následnému ustálení.

V záložce „Pojezd hlavice“ je znázorněna její poloha. Pokud se hlavice nachází mimo startovací zóny, manuálně se tam přesune. Pohyb hlavice je prezentován na obrazovce modrými pruhy v horní a dolní části znázornění pracovní komory.

V záložce „Naprašování“ se volí magnetron, ke kterému je připevněn target s požadovaným materiálem pro depozici. Dále se zde nastaví požadovaná nominální hodnota ionizace. Nastaví se materiálovou konstanta, která slouží QCM měřiči pro sledování rychlosti depozice a již naprašované tloušťce vrstvy. Nyní je možné zapnout chod stroje tlačítkem „Zap.“. Dochází k zapálení plazmy.

Během procesu naprašování je umožněno měnit tlak vakua i teplotu pracovního stolku. Tímto se dá ovlivnit výslednou strukturu deponovaných vrstev.

Naprašování materiálu na substrát umožňuje buď přejíždění magnetronové hlavice z jedné krajní polohy do druhé, nebo zastavení hlavice přímo nad vzorkem. Při druhé variantě je vhodné umístit QCM krystal externího zařízení do pozice vedle vzorku, v ose kolmé na směr pohybu hlavice.

Ukončení procesu depozice provádí tlačítko „Vyp.“, umístěné vedle tlačítka „Zap.“ užitým pro spuštění procesu. Ukončí se regulace vakua. Následuje manuální zavzdušnění komory stejným způsobem, jako při spouštění zařízení. Poté je možné vzorky vyjmout. S ohledem na nastavenou teplotu pracovního stolku, se musí dbát opatrnosti, aby nedošlo k popáleninám od zahřátých vzorků.

Odstavení zařízení

Pokud již nebude zařízení používáno, je nezbytné po vyjmutí vzorků a uzavření víka opět evakuovat pracovní prostor komory. To se provádí tlačítkem „Odstavení přístroje“. Po dosažení vakua je možné přístroj vypnout „Hlavním vypínačem“ na čelní straně základny.

Následujícím krokem je uzavření ventilů v místnosti s naprašovacím zařízením a uzavření kohoutů na tlakových lahvích.

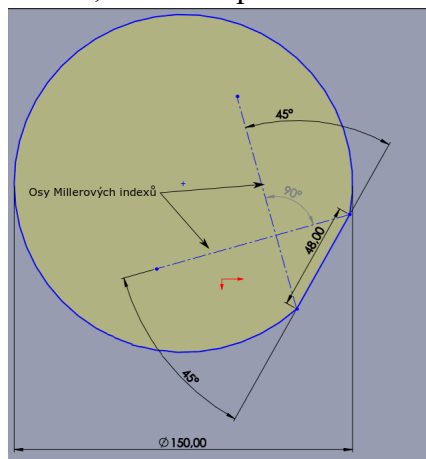
2.3 Zhotovení vzorků

Při seznamování s obsluhou zařízení NP – 12, byly vyrobeny dvě sady vzorků. Každá sada obsahovala tři zástupce pěti zvolených materiálů substrátů.

Příprava vzorků

- a) Sklo – podkladová sklíčka byla nadělena na čtverce pomocí řezáku skla. Hrany poté zabroušeny brusným papírem, aby nedošlo k poranění o hrany.
- b) Korundová keramika – bylo zámyslem nadělit původní čtverce na čtvrtiny stejným způsobem, použitým u podkladového skla. Avšak nedošlo k dostatečnému rozrušení povrchu vlivem tvrdosti korundové keramiky. Došlo tedy k prasknutí mimo zamýšlené linie.

- c) Křemíkový wafer – jedná se o velmi křehký materiál. Byl použit polovodič typu N s Millerovými indexy $\langle 111 \rangle$. Pro vzorky posloužila část, oddělena při prasknutí kotouče. Prasknutím vznikl pásek vhodné šířky, který byl lámáním nadělen na další části. Tento kotouč praská v rovinách shodných s již zmíněnými Millerovými indexy. Ty jsou pro tento typ naznačeny ve dvou rovinách na Obrázku 2.4, vzniklém při návrhu držáku waferu.



Obrázek 2.4 Křemíkový wafer typu N s rozměry a naznačenými osami Millerových indexů

- d) Hliníkový plech – byl v laboratoři nastříhán stolními pákovými nůžkami z tabule na pásy, odpovídající šířce podkladového sklíčka, a poté na čtverce.
- e) Polystyren – z tabule byly nařezány pásy stejné šíře, jako u hliníkového plechu. Tyto pásy byly opět rozděleny na čtverce. Byla použita pilka s plátkem na kov.

Čištění vzorků

Ve všech případech se jednalo o nový, nepoužitý materiál, nebylo tedy nutné vzorky mechanicky čistit od nečistot. Hliník i polystyrén nesly od výroby krycí polyethylenovou fólii. Ta byla odstraněna sloupnutím těsně před chemickým čištěním.

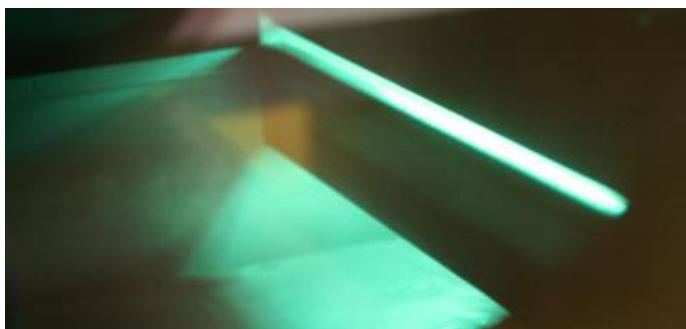
Chemické čištění probíhalo v kombinaci s ultrazvukovým. Substráty byly položeny do Petriho misky a zality dostatečným množstvím izopropylalkoholu. Tato sestava byla následně vložena do vodní lázně v ultrazvukové čističce. Proces ultrazvukového čištění nastaven na 10 minut bez ohřevu.

Následoval oplach v demineralizované vodě a sušení proudem tlakového vzduchu. Poté byly vzorky uloženy v další Petriho misce a přiklopeny víkem.

Depozice

První sada vzorků byla deponována mědi. Pracovní komora byla evakuována na 0,005 Pa. Teplota komory zůstala na defaultní hodnotě 35 °C, taktéž průtok pracovního plynu na 50 sccm. Pro depozici mědi se zvolil pracovním plynem argon s tlakem 3 Pa. Hodnota ionizace byla nastavena na 0,69 kW. Na měřicí přístroj QCM 02 / 5M nastavena hodnota hustoty mědi, tj 8,9 gcm⁻³, toto zaručuje přesné měření rychlosti depozice a tloušťky

nanesené vrstvy. Dále byl spuštěn proces depozice a zapálen plazmatický výboj, jak je zachyceno na Obrázku 2.5.



Obrázek 2.5 Pohled okénkem na zapálenou plazmu

Vzhledem ke značnému množství vzorků uvnitř naprašovací komory, se zvolil postup, kdy přes vzorky přejíždí magnetronová hlava z jedné strany na druhou. Ze zkušeností dřívějších uživatelů zařízení NP – 12, bylo vypořádováno a jimi následně ověřeno, že jeden přejezd měděného targetu při výkonu 1 kW je roven 25 nm nadeponované mědi na substrát. U prvního pokusu se jednalo o výkon 0,69 kW, tedy 17,25 nm pro jeden přejezd. Celkem se provedlo 8 přejezdů, teoretická vypočtená hodnota nanesené vrstvy nesla hodnotu 138 nm. Údaj na QCM měřicím zařízení ukazoval 140 nm. Tento drobný rozdíl ve výpočtu a zobrazené hodnotě může být ovlivněn zanedbanou hodnotou množství pracovního plynu v komoře při výpočtu.

Druhou sadou vzorků byl potahován Titan se zachovaným počtem kusů substrátů. Po evakuování pracovní komory na tlak 0,00489 Pa, byly nastaveny tyto hodnoty: teplota 35 °C, průtok 50 sccm, tlak argonu 2 Pa, výkon 1kW, hustota Ti na měřidle 4,5 gcm⁻³. Dle [4], je depozice mědi čtyřikrát rychlejší než depozice titanu. Z tohoto důvodu bylo zvoleno čtyřikrát více přejezdů (24). Z těchto údajů je možné vypočíst, že jeden přejezd titanového targetu napráší vrstvu tlustou 4,1667 nm, při dvaceti čtyř přejezdech je vypočtená tloušťka vrstvy 100 nm. QCM přístroj ukázal hodnotu 117 nm. I zde platí, že rozdíl mezi výpočtem a QCM může být dán zanedbáním tlaku argonu v komoře.

Dalším seznamovacím krokem s obsluhou zařízení, bylo plazmatické čištění substrátu. Snahou bylo využít poznatku Marka Čejky, který navrhnul, ve své diplomové práci [37], optimalizovaný postup pro tvorbu tenkých vrstev. Tento postup byl aplikován na předchozí typ vzorků, který se liší od vzorků zvolených v [37]. Jistá podobnost je v použití skleněného substrátu, avšak s rozličným složením.

Po vyrobení třetí sady zkušebních vzorků, proběhlo chemické čištění spolu s ultrazvukovým. Následoval krok čištění povrchu plasmou přímo v naprašovacím zařízení. Zvolily se stejné hodnoty jako v [37], tlak argonu 2,5 Pa a hodnota ionizace 2kW, délka procesu čištění 10 minut. Aby nedošlo ke kontaminaci vzorku, bylo přistoupeno přímo k depozici vrstvy. Zvolen byl titan. Nastavené hodnoty depozice byly: teplota 35 °C, průtok plynu 50 sccm, tlak argonu 2 Pa, výkon ionizace 1 kW. V zámyslu bylo opět 24 přejezdů magnetronové hlavice. Během čtvrtého přejezdu při naprašování se začal linout z naprašovacího zařízení zápach spáleného plastu. Vzápětí začal vycházet z tohoto zařízení zvuk připomínající elektrické výboje. Zařízení bylo odstaveno a bližším průzkumem zjištěno, že došlo ke zničení zdroje vysokého stejnosměrného napětí.

Zkouška adheze

Zapříčiněním závady na naprašovacím zařízení, nemohlo dojít k výrobě dalších vzorků. Pro vyhodnocení přilnavosti deponované vrstvy k substrátu byly použity testovací vzorky vyrobené při seznamování s obsluhou zařízení.

K vyhodnocení přilnavosti naprášené vrstvy na substrát, byla vybrána mřížková metoda. Tuto metodu přímo stanovuje [24], její princip byl popsán v kapitole 1.7 bod c). Pro zhotovení mřížky je možné použít řezný nástroj s jedním či více ostřími definovaného tvaru, jak je znázorněno na Obrázek 1.20. Je nutné dodržet ostrost řezného nástroje. Pokud dojde k otupění (ukázka na Obrázku 2.6), ostří musí být přebroušeno nebo vyměněno. Řez se provádí skrz šablonu s definovanými rozestupy. Pro nanesené vrstvy do 60 μm je stanoven rozstup řezů 1 mm. Tento postup se opakuje kolmo k prvním řezům, aby vznikla mřížka. Uvolněný materiál z oblasti řezu se odstraňuje buď štětcem, stlačeným vzduchem nebo dusíkem, případně samolepicí páskou [24].



Obrázek 2.6 Ukázka otupělého ostří před výměnou.

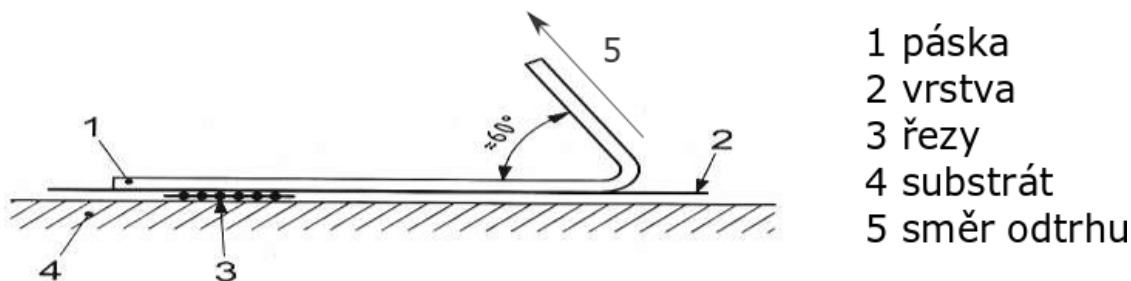
Nástroje pro provedení mřížkové zkoušky byly: sada pro zhotovení mřížkové metody (Obrázek 2.7) obsahující odlamovací nůž, samolepicí pásku a šablonu. Pro přesnější určení výsledků a zhotovení fotografií byl využit optický mikroskop Olympus SZ61 vybavený kamerou pro snímání a propojení s počítačem.



Obrázek 2.7 Sada pro zhotovení mřížkové metody

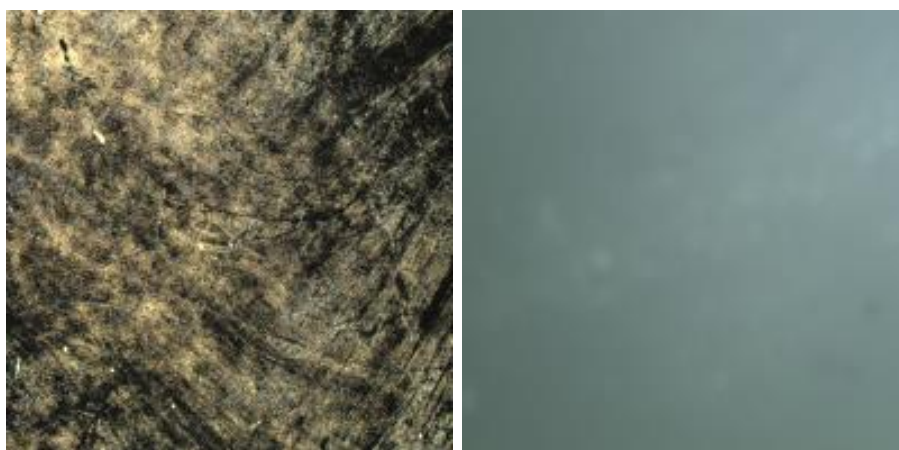
Zkoumaný vzorek se umístil na rovný a pevný povrch, aby se zabránilo deformaci vzorku během zkoušky. Po zhotovení mřížky bylo přistoupeno k odstranění uvolněného materiálu pomocí samolepicí pásky ze sady pro zhotovení mřížkové metody. Střed pásky se položil na mřížku rovnoběžně s jednou sérií řezů.

Dobrého kontaktu mezi páskou a vrstvou zajišťovalo přitlačení pásky a její přetření prstem nad zhotovenou mřížkou. Po pěti minutách od připevnění byla páska odstraněna uchopením za volný konec a rovnoměrným tahem pod úhlem 60° došlo k jejímu sloupnutí, viz Obrázek 2.8 [24].

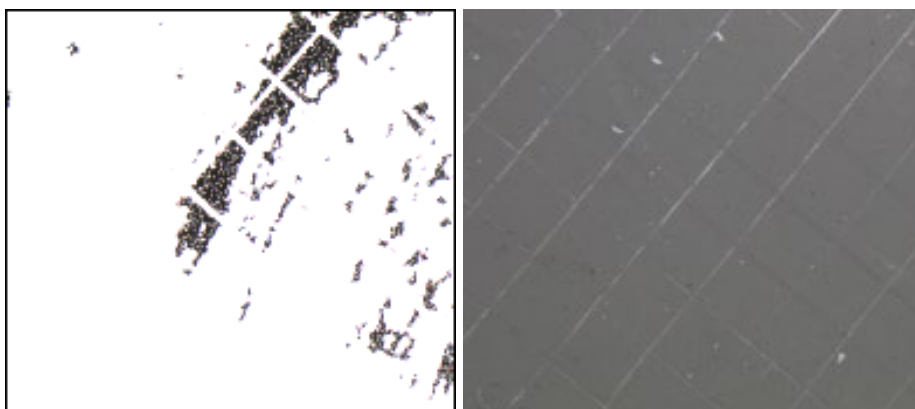


Obrázek 2.8 Polohy lepicí pásky [24].

- a) Sklo – na Obrázku 2.9 jsou záběry z optického mikroskopu nanesených vrstev na skleněném substrátu před použitím mřížkové metody. Zvětšení mikroskopu bylo nastaveno na 2. Na Obrázku 2.10 je již skleněný substrát po provedení mřížkové metody. Pro zvýšení rozpoznatelnosti byla levá část obrázku, vrstva mědi na skle po odtrhu pásky, dodatečně orámována, aby vynikla.



Obrázek 2.9 Nanesené vrstvy na skle (levý: Cu, pravý: Ti).

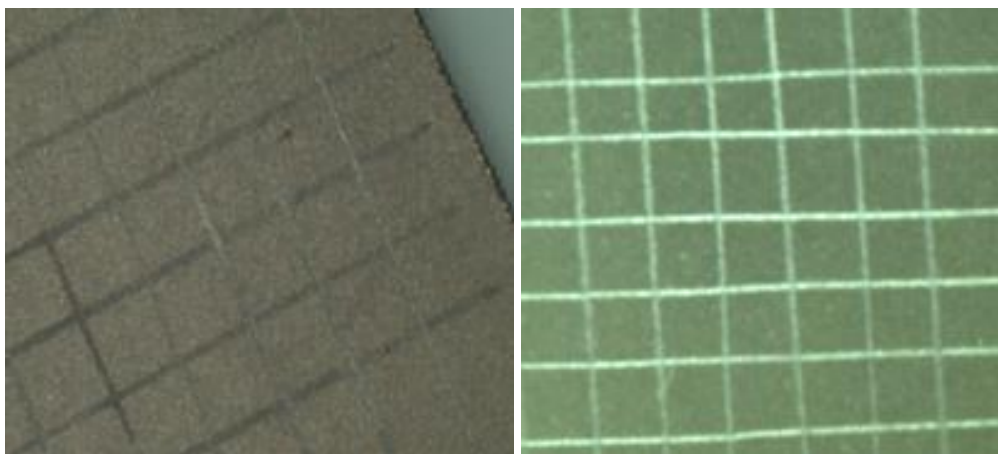


Obrázek 2.10 skleněný substrát s mřížkou po odtržení pásky (levý: Cu, pravý: Ti).

- b) Korund – na následujícím Obrázku 2.11 jsou substráty před mřížkovou metodou. Obrázek 2.12 ukazuje vzorky korundové keramiky již po provedení mřížkové metody. Zelené zabarvení u vzorku nosícího titanovou vrstvu je způsobeno špatně nastaveným filtrem snímací kamery mikroskopu.



Obrázek 2.11 Nanesené vrstvy na korundové keramice (levý: Cu, pravý: Ti).

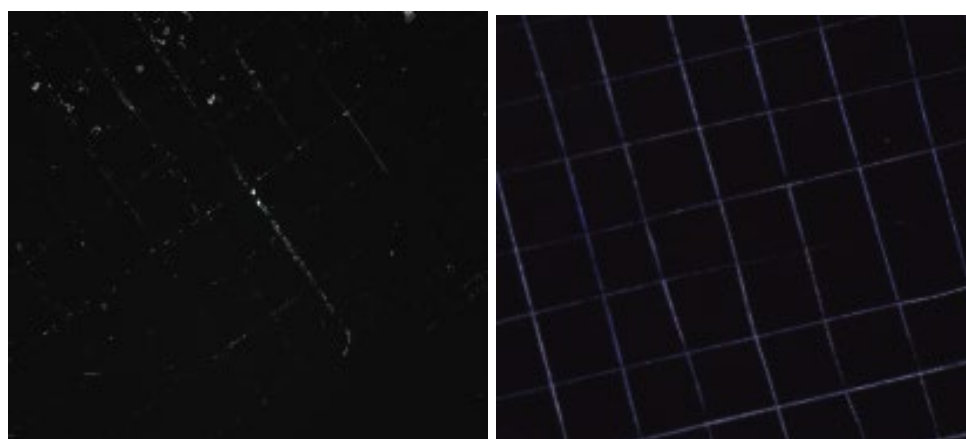


Obrázek 2.12 Korundový substrát s mřížkou po odtržení pásky (levý: Cu, pravý: Ti).

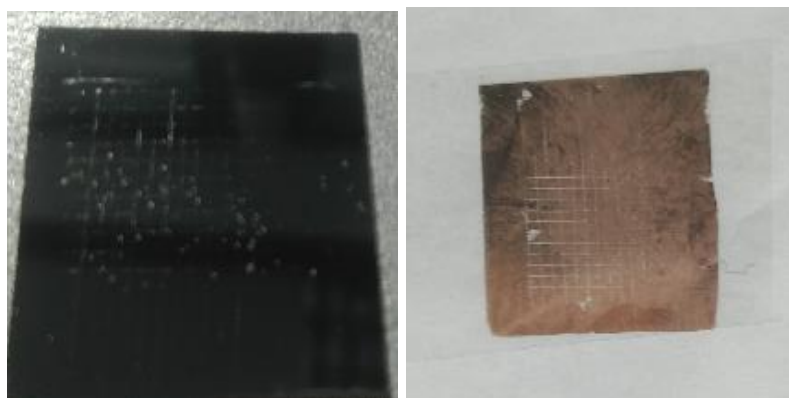
- c) Křemík – Obrázek 2.13 zobrazuje opět substráty před započítím mřížkové metody. V levé části Obrázku 2.14, kde je vzorek po aplikaci mřížkové metody s nanesenou vrstvou mědi, je vidět substrát po téměř úplném odloupení vrstvy. Světlé tečky jsou zbytky měděné vrstvy, mřížka je prořez nástroje do základního substrátu. Na Obrázku 2.15, který je vyfocen fotoaparát, je vlevo vidět křemíkový substrát po sloupnutí měděné vrstvy. Vpravo je měděná vrstva, která ulpěla na pásce.



Obrázek 2.13 Nanesené vrstvy na křemíkovém waferu (levý: Cu, pravý: Ti).



Obrázek 2.14 Křemíkový substrát s mřížkou po odtržení pásky (levý: Cu, pravý: Ti).

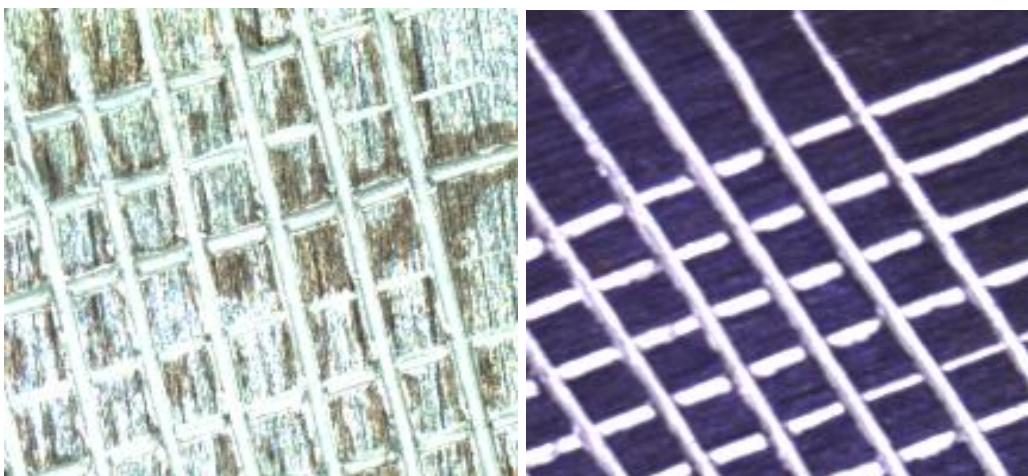


Obrázek 2.15 Křemíkový substrát po odloupení pásky vlevo, vpravo páska s odloupnutou mědí.

- d) Hliník – Obrázek 2.16 ukazuje naprášené vrstvy na hliníkovém plechu. Titan, vpravo, se zabarvil modře. Na Obrázku 2.17 vlevo je vidět, že měď na povrchu hliníku po odlepení pásy téměř neulpěla.

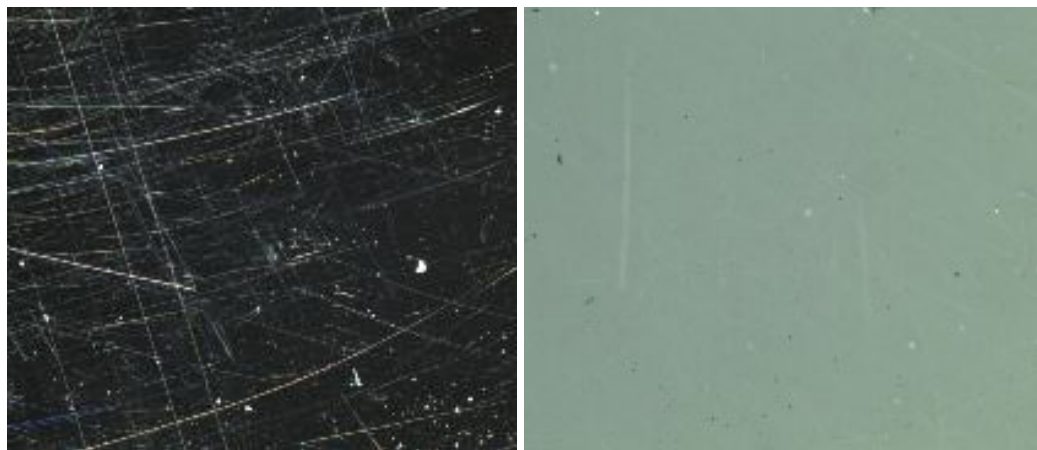


Obrázek 2.16 Nanesené vrstvy na hliníkovém plechu (levý: Cu, pravý: Ti).

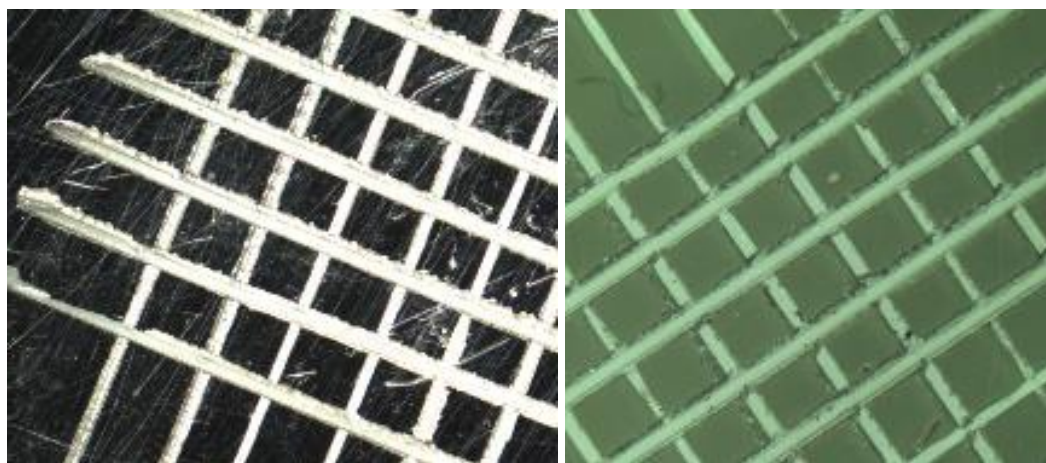


Obrázek 2.17 Hliníkový substrát s mřížkou po odtržení pásy (levý: Cu, pravý: Ti).

- e) Polystyren – Jak je nejvíce vidno na levé části Obrázku 2.18, je povrch polystyrenového substrátu náchylný na poškrábání. Tyto škrábance vznikly nejspíše o dno Petriho misky při ultrazvukovém čištění a následná depozice je nezakryla. Následující Obrázek 2.19 znázorňuje substráty po provedené zkoušce.

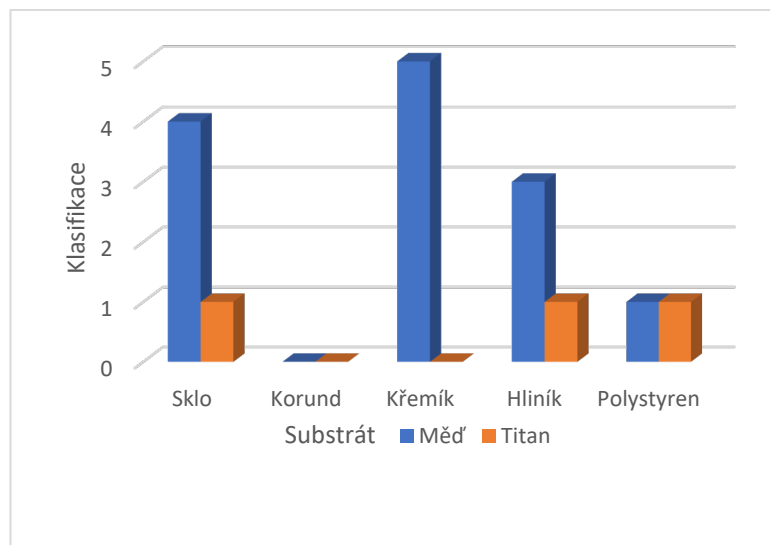


Obrázek 2.18 Nanesené vrstvy na polystyrenu (levý: Cu, pravý: Ti).



Obrázek 2.19 Polystyrenový substrát s mřížkou po odtržení pásky (levý: Cu, pravý: Ti).

Vyhodnocení výsledků mřížkové zkoušky ukazuje Obrázek 2.20. Klasifikace je dle příslušné normy [24] porovnáním s tabulkou z Obrázku 1.21. Nejlepších výsledků dosáhla korundová keramika. Mřížka nebyla vůbec poškozena. Hrubost a poréznost tohoto povrchu mají dobrý vliv na přilnavost obou deponovaných materiálů. Největší rozdílnosti vykazuje přilnavost křemíkového waferu. Zatím co měď se z tohoto substrátu téměř celá sloupala, titan zůstal neporušen. Ve všech případech bylo nastavení mikroskopu na hodnotě 2.



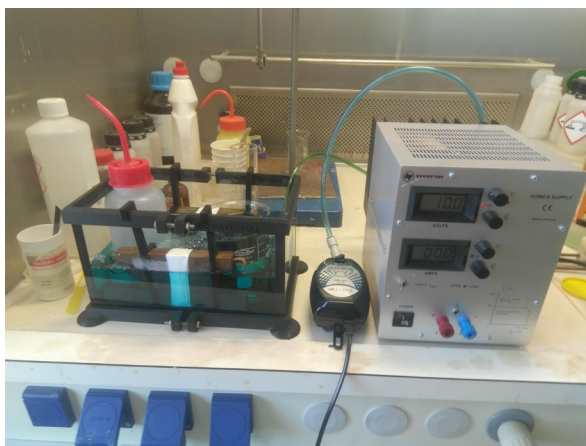
Obrázek 2.20 Výsledky mřížkové metody.

2.4 Tenkovrstvý systém

Na základě předchozích zjištění, bylo rozhodnuto použít zbylé vzorky substrátu pokovené titanem a vyrobit tenkovrstvý systém. S ohledem na nefunkčnost naprašovacího zařízení, se přistoupilo k metodě galvanického pokovení. Tato metoda je zmíněna v kapitole Nevakuové metody podkapitola elektrodepozice.

Galvanizace

Zvoleným povlakovým materiálem byla měď. Pro galvanické poměďování se používají tři druhy roztoků: kyselé, alkalické a kyanidové. Za elektrolyt byl zvolen roztok Cupracit TP od firmy Atotech. Tento roztok je využíván na pokovení průchodů mezi jednotlivými vrstvami desek plošných spojů. Jeho základem je rozpuštěný síran měďnatý CuSO_4 , neboli modrá skalice. Na Obrázku 2.21 je vidět sestava pro galvanizaci. Tvoří ji skleněná nádrž vyztužená plastovými okraji, dvě sady měděných anod zavěšených na plastových držácích, laboratorní zdroj, kompresor pro provzdušňování elektrolytu, elektrolyt. Nádoby vložené do nádrže slouží pouze pro zvýšení hladiny elektrolytu.



Obrázek 2.21 Sestava pro galvanizaci mědi.

Každý výrobce galvanické lázně stanovuje horní a spodní hranici proudové hustoty. Mimo tyto hranice již nelze získat kvalitní povlaky. Na hranici horní limitní proudové hustoty převyšuje rychlost vylučování kovu z roztoku rychlost jeho přísunu ke katodě. Poté dochází k prudkému vylučování vodíku a vzniku tzv. „spáleného“ povlaku [38].

U spodní hranice je rychlost vylučování příliš pomalá, povlak nedosahuje dobrých parametrů. Pokud klesne napětí pod rozkladnou hodnotu, proces vylučování ustává [38].

Výrobce zvoleného elektrolytu na svém webu [39] stanovuje proudovou hustotu na 1 Adm^{-2} až 4 Adm^{-2} . Tato informace nám slouží pro výpočet potřebného proudu při galvanizaci jednotlivých vzorků. Byla stanovena dolní polovina rozsahu proudové hustoty na hodnotu 2 Adm^{-2} .

Výpočet pokovovacího proudu pro jednotlivý vzorek spočívá ve vypočtení plochy vzorku v dm^2 , která se potom vynásobí proudovou hustotou. Pokud tedy máme vzorek $2,5 \times 2,5 \text{ cm}$, bude jeho plocha $0,0625 \text{ dm}^2$. Při proudové hustotě 2 Adm^{-2} , bude proud 125 mA . Jednotlivé rozměry vzorků jsou v Tabulce 2.7, kde jsou uvedeny i další hodnoty potřebné pro pokovení.

Tabulka 2.7 Hodnoty pro galvanické pokovení jednotlivých substrátů

Materiál substrátu	Rozměr vzorku [cm]	Pokovovací proud [A]	Hmotnost vyloučené vrstvy [kg]	Čas pokovování [s]
Sklo	2.6 x 2.6	0.135	$6.06 \cdot 10^{-6}$	136
Korund	2.4 x 2.8	0.140	$6.02 \cdot 10^{-6}$	130
Křemík	2.1 x 2.7	0.113	$5.08 \cdot 10^{-6}$	136
Hliník	2.6 x 2.6	0.135	$6.06 \cdot 10^{-6}$	136
Polystyren	2.6 x 2.6	0.135	$6.06 \cdot 10^{-6}$	136

Hmotnost vyloučené vrstvy na vzorku se vypočítá ze vztahu [40]:

$$m = V \cdot \rho \quad [\text{kg}], \quad (2.1)$$

kde m je hmotnost vyloučené vrstvy, ρ je hustota vylučovaného materiálu, v tomto případě mědi 8960 kgm^{-3} , V je plánovaný objem vyloučené vrstvy. Pro výpočet objemu použijeme vztah [40]:

$$V = a \cdot b \cdot c \quad [\text{m}^3], \quad (2.2)$$

kde $a \cdot b$ jsou rozměry vzorku a c je plánovaná tloušťka vyloučené vrstvy, v našem případě $1 \mu\text{m} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}$.

Čas pokovování se stanovuje úpravou Faradayových zákonů takto [40]:

$$m = \frac{M_m \cdot I \cdot t}{n_a \cdot e \cdot v} = \frac{M_m \cdot I \cdot t}{F \cdot v} \Rightarrow t = \frac{m \cdot n_a \cdot e \cdot v}{M_m \cdot I} \quad [\text{s}], \quad (2.3)$$

kde t je čas pokovování, m hmotnost vyloučené vrstvy, N_A Avogardova konstanta $6,029 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$, e náboj elektronu $1,6 \cdot 10^{-19}$, v je mocenství iontu, někdy také značené z , u mědi má hodnotu 2, M_m molární hmotnost, u mědi $63,5 \text{ g mol}^{-1} = 6,35 \cdot 10^{-2} \text{ kg mol}^{-1}$ a I je pokovovací proud.

Po zapojení sestavy a napuštění elektrolytu do nádrže byl jako první, pro svoji odolnost, vybrán vzorek na korundovém substrátu. Z Tabulka 2.7 byl zvolen vhodný proud a čas. Časovač byl spuštěn v okamžiku ponoření vzorku do lázně. Tento proces se opakoval se všemi vzorky. Na Obrázku 2.22 je vidět držák vzorků s uchopeným substrátem, který je ponořený v provzdušňovaném pokovovacím roztoku.



Obrázek 2.22 Vzorek ponořený v elektrolytu.

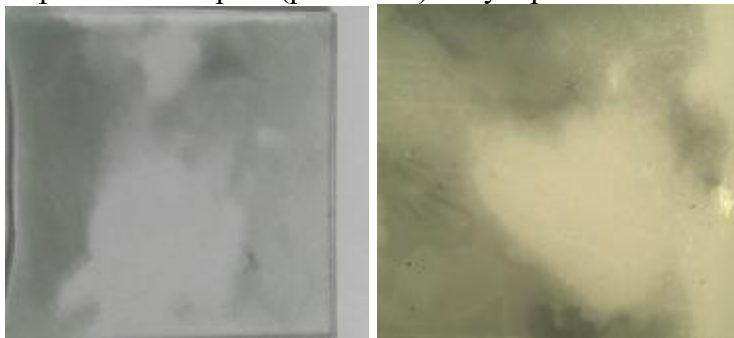
Pro názornost jsou v další části, u daných vzorků, vždy dva snímky. Jeden, pořízen hned po vytažení vzorku z galvanické lázně, fotoaparátem a další z mikroskopu po ukončení nanášení vrstev na všech vzorcích. Poslední Obrázek 2.28, ukazuje skleněný substrát po vytažení z elektrolytu. Na ramenou držáku je patrna vrstva mědi, která na něm při elektrolýze ulpěla. Ve spodní části tohoto obrázku je vidět připojený kladný pól k měděné anodě.

- a) Korund – na Obrázku 2.23 je možné vidět v levé části světlejší skvrnu, v tomto místě začalo rozpouštění titanové vrstvy v elektrolytu. Na pravé části je patrna velmi jemná vrstva mědi nanesená na titanu, která byla patrna až pod mikroskopem při nastavení zvětšení na 2.



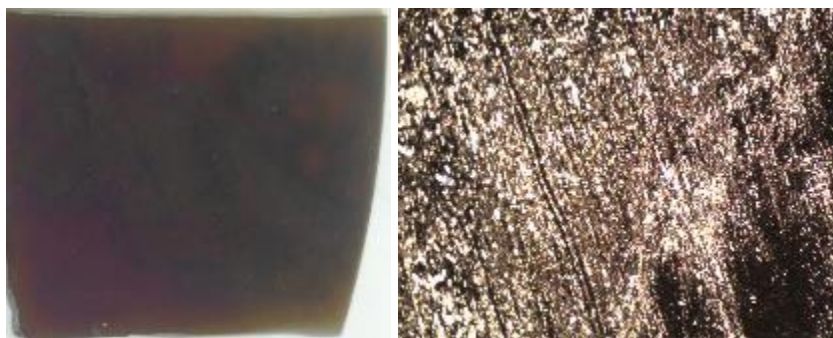
Obrázek 2.23 Korundový vzorek (levý focen fotoaparátem, pravý mikroskopem).

- b) Sklo – při pokovování skleněného substrátu došlo k rozpuštění téměř celého povrchu titanové vrstvy, jak je možné vidět na levé části Obrázku 2.24. Při zvětšení pod mikroskopem (pravá část) nebyla patrna žádná stopa mědi.



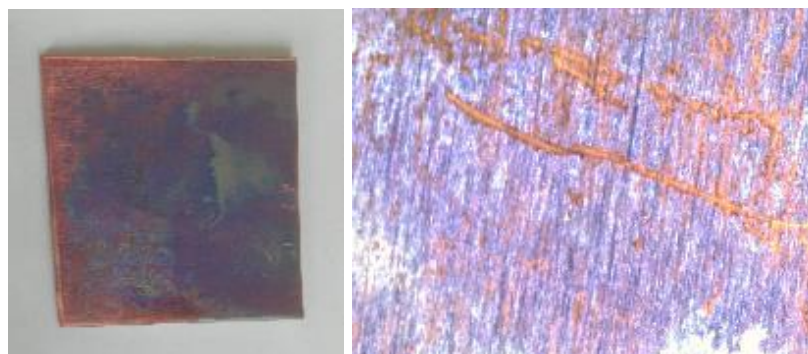
Obrázek 2.24 Skleněný vzorek (levý vyfocen fotoaparátem, pravý mikroskopem).

- c) Křemík – Povrch křemíkového substrátu nenese stopy po rozpouštění titanové vrstvy. Obrázek 2.25 ukazuje v pravé části strukturu nanesené měděné vrstvy zachycené pod mikroskopem.



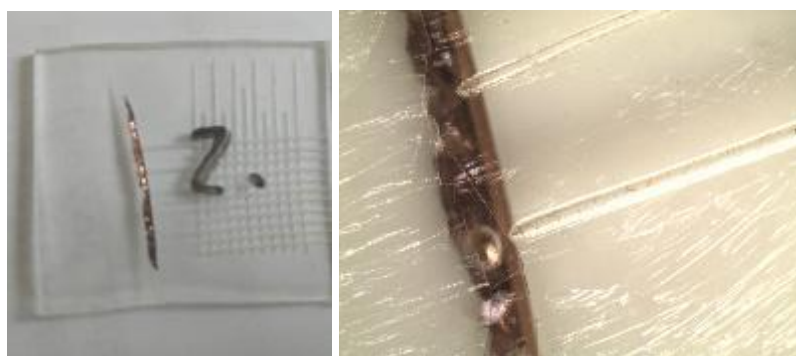
Obrázek 2.25 Křemíkový vzorek (levý vyfocen fotoaparátem, pravý mikroskopem).

- d) Hliník – na Obrázku 2.26 vlevo je vidět, že na okrajích substrátu se již začala nanášet vrstva mědi. Tento efekt je spjatý s vyšší proudovou hustotou na krajích vzorku. Ovšem současně začalo docházet k rozpouštění titanové vrstvy, jak je možné sledovat ve střední části vzorku. Na detailu z mikroskopu to jsou stříbrné skvrny.



Obrázek 2.26 Hliníkový vzorek (levý vyfocen fotoaparátem, pravý mikroskopem).

- e) Polystyren – při pokovování tohoto vzorku došlo k naprostému rozpuštění titanové vrstvy. Tento vzorek byl poškozen teplotou pracovního stolku v naprašovacím zařízení a vznikla v něm trhлина. Následně byl testován jako první při seznamování se zkouškou na adhezi. Vzhledem k výsledku při pokovování tohoto kusu, nebyl další vzorek použit. Za zmínku stojí vrstva mědi, která se nanasla v již zmíněné prasklině. Ta byla na druhé straně nežli titanová vrstva. Na této straně nebyly ani elektrické kontakty. Na Obrázku 2.27 je v levé části vidět strana s prasklinou. Vpravo je detail na stranu vzorku, kde byla deponována vrstva titanu. Jsou zde patrné zářezy po mřížkové metodě a prosvítající vrstva mědi v prasklině.



Obrázek 2.27 Vzorek z polystyrenu (levý vyfocen fotoaparátem, pravý mikroskopem).



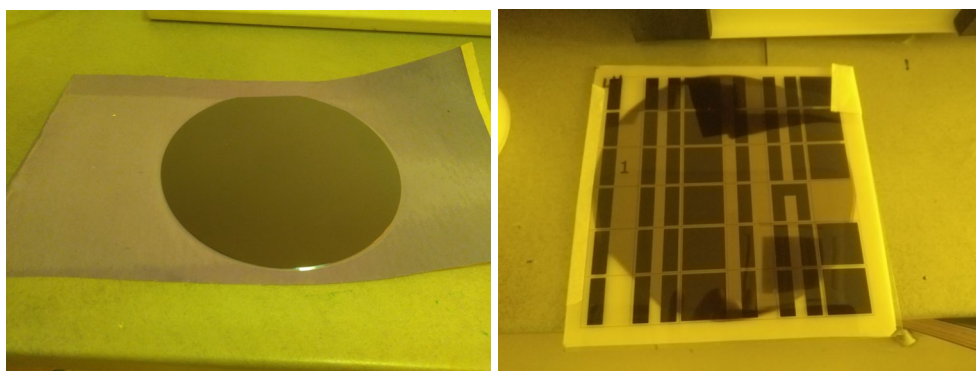
Obrázek 2.28 Skleněný substrát po vytažení z elektrolytu.

Roztok Cupracit TP s největší pravděpodobností obsahuje příměs kyseliny sírové, která se používá ke zvýšení vodivosti elektrolytu a tím možnosti využívat větší proudovou hustotu při depozici. Toto tvrzení nemohlo být potvrzeno absencí datasheetu, který nebyl poskytnut ani českou pobočkou výrobce. Titan reaguje s kyselinou sírovou za vzniku komplexní kyseliny trisulfatotitaničité [41]. Toto mohlo přispět k rychlejšímu rozpuštění tenké vrstvy.

Maskování

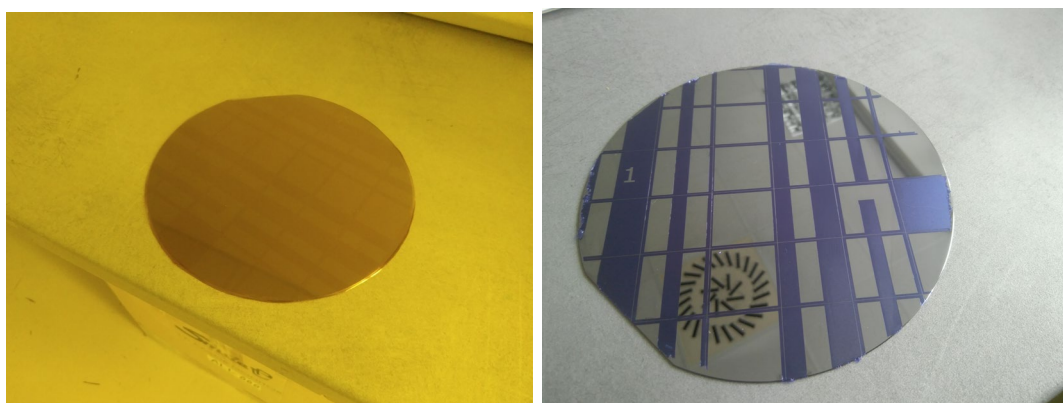
Za účelem vytvořit vícevrstvý tenkovrstvý systém, byly vytvořeny na 3D tiskárně držáky substrátu, které mají zajišťovat přesnou polohu filmové předlohy při osvitu fotorezistu naneseného na substrátu.

K tomuto způsobu vytvoření tenkovrstvého systému však z již zmíněných důvodů nemohlo dojít. Pro názornost byl vytvořen jeden cyklus nanesení – vyvolání fotorezistu na křemíkový wafer. První část tohoto cyklu spočívá v očištění substrátu v izopropylalkoholu od nečistot. Dalším krokem je nanesení suchého fotorezistu na povrch waferu pomocí laminovacího zařízení. Zalaminovaný wafer je možné vidět v levé části Obrázku 2.29. Dalším dílčím krokem bylo ostříhnutí přebytečného fotorezistu a vložení do držáku. Poté následovalo usazení a zafixování filmové předlohy lepicí páskou. Tento krok je na pravé části Obrázku 2.29.



Obrázek 2.29 První část cyklu nanesení – vyvolání fotorezistu (vlevo zalaminovaný wafer ve fotorezistu, vpravo wafer umístěný v držáku)

Následoval osvit v osvětlovací jednotce. Tento proces trval 16 sekund. Po osvitu byl substrát vyjmut z držáku (Obrázek 2.30 vlevo) a vložen do světlo nepropustné fólie.



Obrázek 2.30 Další část cyklu nanesení – vyvolání fotorezistu. (vlevo substrát po osvitu, vpravo výsledný motiv na substrátu)

Dalším krokem bylo stažení krycí fólie fotorezistu a jeho vyvolání chemickou cestou v roztoku uhličitanu sodného. Vývojka musí být předem zahřáta na 98 °F, což odpovídá zhruba 37 °C. Namočený substrát se houbičkou jemně omývá, aby došlo k co

nejrychlejšímu odplavení neosvíceného fotorezistu. Tímto krokem se zkrátí exponování fotorezistu chemické lázni a sníží se riziko rozpuštění (podleptání) požadovaného motivu. Po oplachu a zaschnutí je substrát připraven k použití. Křemíkový wafer s již hotovým motivem je na pravé části Obrázku 2.30 .

Posledním krokem by bylo stripování fotorezistu po naprášení požadované vrstvy materiálů. Tento krok se provádí chemickou cestou, nejčastěji v kyselině sírové. Ta je nepoužitelná pro kovové povlaky, protože by s nimi mohla reagovat. Další alternativou je odstranění v acetonu, případně průmyslovém roztoku pro odstraňování fotorezistu.

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo prostudovat možnosti vytváření tenkých vrstev na různých substrátech. Po zhodnocení výsledků testů základních parametrů zhotovených vzorků, měl být navrhnout postup pro výrobu tenkovrstvých systémů.

Práce popisuje v teoretické části různé způsoby depozice tenkých vrstev, předdepozicičními procesy přípravy substrátů a způsoby vyhodnocení vrstev takto nanesených. Jedním z bodů této části je kontrola adheze naprášené vrstvy. Poznatky získané při zpracování sloužily při uskutečnění praktické části.

Praktická část práce obsahuje seznámení se s obsluhou magnetronového naprašovacího zařízení a zhotovení testovacích vzorků na různých substrátech. V rámci seznamování se se zařízením bylo vyzkoušeno naprašování mědi a následně titanem na pět druhů substrátů. Jednalo se o sklo, korundovou keramiku, křemík, hliník a polystyren. Při zhotovování v pořadí třetí sady vzorků došlo k závadě naprašovacího zařízení. Z této příčiny nemohlo být dále pokračováno v seznamování a výrobě vrstev na tomto zařízení. U hliníkového substrátu je patrný modrý odstín nanesené vrstvy. Titan se zbarvuje modře při oxidaci. Zdrojem kyslíku při naprašování mohla být oxidová vrstva na povrchu hliníku, která na něm vzniká samovolnou reakcí. Méně patrný odstín modré je také u křemíkového waferu (Obrázek 2.13), který také nese na povrchu oxidovou vrstvu.

Pro další krok bylo zvoleno, otestovat u vzniklých vzorků přilnavost mezi vrstvou a substrátem. Mřížkovou zkouškou (viz kapitola Zkouška adheze) prošly, u titanového povlaku, nejlépe korundová keramika společně s křemíkem. O stupeň horší hodnocení mají zbylé materiály. Měděný povlak nejlépe držel v kombinaci s korundovou keramikou, následoval polystyren. Nejhorší výsledek byl u křemíku, kde po odlepení pásky nezůstaly žádné stopy mědi na podkladu. Skleněný substrát nese hodnocení 4 a hliník 3, výsledek je shrnut na Obrázku 2.20. Testované vzorky byly menších rozměrů než šablona s milimetrovou roztečí. Při řezání drážek docházelo k nechtěnému posuvu vzorku oproti šabloně. Bylo by vhodné vzorek pevně zafixovat s podložkou (například oboustrannou páskou).

Výroba tenkovrstvých systému byla, při závadě naprašovacího zařízení, vyzkoušena nevakuovou metodou. Konkrétně se jednalo o elektrodepozici měděné vrstvy. Elektrolytem byl zvolen roztok Cupracit TP používaný při prokovování průchodů mezi vrstvami DPS. Daná galvanická lázeň se v praxi neosvědčila. S největší pravděpodobností obsahuje kyselinu sírovou a ta reaguje s titanem. Vhodnějším by mohl být kyanidová mědicí lázeň, která není tak agresivnější. Nevýhodou je její jedovatost. Jistých výsledků se dostalo při poměďování hliníkového substrátu, kde se nanasla vrstva na okrajích. V těchto místech je větší proudová hustota, avšak také docházelo k rozpouštění titanové vrstvy na vzorku. Křemíkový substrát nesl větší míru měděného pokovení (viz Obrázek 2.25 pravá strana), ale i zde se nejednalo o celistvou vrstvu.

V závěrečné části se provedlo maskování křemíkového waferu. Tímto způsobem měly být zamaskovány všechny substráty při výrobě tenkovrstvého systému. Po depozici první vrstvy by se stripoval fotorezist. Tento cyklus se mohl opakovat třikrát s použitím

třech různých filmových předloh používaných při osvitu. Vznikl by tak systém třech tenkých vrstev s různou topologií. Vhodné by bylo následné dělení křemíkového substrátu laserovým paprskem. Tento materiál je totiž křehký a při dělení často praská mimo zamýšlené linie.

V případě navazující práce by bylo vhodné přistoupit přímo k čištění povrchu substrátu chemicky a následně plazmaticky. Zajímavé by také bylo vyzkoušet různé varianty galvanických lázní v kombinaci s tenkými vrstvami.

LITERATURA

- [1] *Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings (Third Edition)*. Spojené státy americké: William Andrew Publishing, 2010. Materials Science 2009. ISBN 978-081-5520-313.
- [2] ECKERTO VÁ, Ludmila. *Fyzika tenkých vrstev*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1973. Populární přednášky o fyzice.
- [3] SZENDIUCH, Ivan, *Tenké vrstvy (TV) (Thin Films) + Hybridní Integrované Obvody (HIO), (Hybrid Integrated Circuits)*. V Brně, 2011. Přednáška. VUT Brno.
- [4] SOUTOR, Zdeněk, Jaroslav ŽŮREK a Josef ŠA VEL. *Hybridní integrované obvody*. Bratislava: SNTL, 1982. ISBN 621-3-049-776.
- [5] MOHYLA, Miroslav. *Technologie povrchových úprav kovů*. 3. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita, 2006. ISBN 80-248-1217-7.
- [6] Electroplating. *Chem.libretexts* [online]. 5/2019, 2 [cit. 2020-03-04]. Dostupné z:
[https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical_Chemistry/Supplemental_Modules_\(Analytical_Chemistry\)/Electrochemistry/Electrolytic_Cells/Electroplating](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical_Chemistry/Supplemental_Modules_(Analytical_Chemistry)/Electrochemistry/Electrolytic_Cells/Electroplating)
- [7] HUBÁLEK, Jaromír. *Mikrosenzory a mikroelektromechanické systémy*. V Brně, 2012. Skripta. VUT Brno.
- [8] EKRT, Ondřej. *Technologie a vlastnosti tenkých vrstev, tenkovrstvé senzory* [online]. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická [cit. 2020-03-23]. Dostupné z:
https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010359/05_TechnologieCVD_+PVD_PECVD_MOVPE_MBE.pdf
- [9] *Your surface—our coating* [online] [cit. 2020-04-06]. Dostupné z:
<https://www.fhr.biz/en/functional-layers>
- [10] ŠA VEL, Josef. *Elektrotechnologie: materiály, technologie a výroba v elektronice a elektrotechnice*. Praha: BEN – technická literatura, 2006. ISBN 978-80-7300-1.
- [11] *Tenké vrstvy* [online]. 2010 [cit. 2020-04-06]. Dostupné z:
http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_fel_1.pdf
- [12] NOVOTNÝ, Michal. *Metody povlakování rezných nástrojů*. Brno, 2012. Bakalářská práce. VUT Brno.
- [13] ČIPEROVÁ, Zuzana. *Reaktivní magnetronové naprašování vrstev Zn-Sn-O a charakterizace jejich vlastností*. Plzeň, 2016. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [14] *Iontové, reaktivní, magnetronové naprašování, iontová implementace* [přednáška] [cit. 2020-04-24]. Dostupné z:

https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010359/04_naprasov%C3%A1n%C3%AD.pdf?redirected

- [15] Používání chemických látek při povrchových úpravách materiálů (Bezpečné používání nebezpečných chemických látek a směsí). 3. Praha: Výzkumný ústav bezpečnosti práce, 2012. ISBN 978-80-87676-00-4.
- [16] Ultrazvukové čištění. *Ultrazvuk* [online]. 2015 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.ultrazvuk-sro.cz/aplikace-ultrazvuku>
- [17] ČSN EN ISO 3868 (03 8186): Kovové a jiné anorganické povlaky. Měření tloušťky povlaky. Metoda mnohosvazkové interferometrie podle Fizeaua. 1997.
- [18] ČSN ISO 4518: Kovové povlaky. Měření tloušťky povlaku. Profilometrická metoda. 1994.
- [19] Kalotest: Charakteristika činnosti [online]. [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <https://www.opi.zcu.cz/kalotest.html>
- [20] ZIMA, J. a P. ELEDER. METODA QCM-D DOBÝVÁ JEDEN OBOR ZA DRUHÝM. Chemagazín [online]. 2012, 22(5) [cit. 2020-05-27]. Dostupné z: <https://www.chromspec.cz/download/chromspec-qcm-d.pdf>
- [21] Měření plošné rezistivity [online]. [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: https://www.sheet-resistancemeasurement.com/detail_tflab_cz.html
- [22] Fyzikální olympiáda, Experiment Q-Q1.: Experiment [online]. In: . IPHO, 2016 [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/archiv/mfo/47/TRANSLATION-E1-Q-CZE-%C4%8Cesky.pdf>
- [23] ČSN EN ISO 4624: Nátěrové hmoty – Odtrhová zkouška přilnavosti. 2017.
- [24] ČSN EN ISO 2409: Nátěrové hmoty – Mřížková zkouška. 2013.
- [25] LUKÁŠ, Petr. *Využití neutronových difrakčních metod v materiálovém výzkumu* [online]. 31.5.2002 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: http://www.xray.cz/xray/csca/kol2002/doc/petr_lukas.htm
- [26] KRÍŽ, Antonín. Hodnocení vlastností tenkých vrstev nitridu kovu [online]. ZČU v Plzni [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/HODNOCENI_VLASTNOSTi_TENKYCH_VRSTE_V_%20NITRIDU_KOVU.pdf
- [27] STARÝ, Jiří. Plošné spoje a povrchová montáž: Výukový text. Brno, 2014.
- [28] HONSKUS, Petr. VÝROBA A ZPRACOVÁNÍ SKLA: Referenční dokument o nejlepších dostupných technikách u stacionárních zdrojů nespádajících pod BREF. Konečná verze. 2015.
- [29] Vlastnosti skla [online]. [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://www.verkon.cz/vlastnosti-skla/#>
- [30] OVČAČÍKOVÁ, Hana a Jozef VLČEK. Speciální keramické materiály. Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3365-1.
- [31] Technologie bílých substrátů. Elceram [online]. [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <http://www.elceram.cz/cs/technologie-technologie-bilych-substratu.html>

- [32] ŘEZNÍČEK, Michal. Polovodičové čipy a integrované obvody: 3. přednáška.
- [33] MALÝ, Zdeněk a Mojmír SIMERSKÝ. Elektrotechnologie: Elektrotechnické materiály. Brno: SNTL, 1980. ISBN 04-517-80.
- [34] TOTTEN, George a Scott MACKENZIE. Handbook of aluminium. CRC Press, 2003. ISBN 08-247-0896-2.
- [35] LEDERER, Jaromír. Polystyren [online], 31 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://chemistry.ujep.cz/userfiles/files/POLYSTYREN.pdf>.
- [36] Polystyren (PS): Výroba, Trh, Cena A Jeho Vlastnosti. Yangzhou Chengsen Plastics Co., Ltd [online]. 29. 4. 2018 [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <http://cz.absmanufacturer.com/info/polystyrene-ps-production-market-price-an-25506646.html>
- [37] ČEJKA, Marek. Optimalizace tvorby tenkých vrstev kovových materiálů. Brno, 2014. Diplomová práce. VUT Brno. Vedoucí práce Jiří Šubarda.
- [38] BENEŠOVÁ, Dana a Viktor KREIBICH. Kompozitní povlaky: základy elektrochemie. Povrcháři [online]. říjen 2015, (6) [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: http://povrchari.cz/kestazeni/201506_povrchari.pdf
- [39] Cupracid® AC: Conformal copper plating using soluble anodes and high current densities [online]. [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: <https://www.atotech.com/products/electronics/electrolytic-plating/cupracid-ac/>
- [40] Učebnice fyziky [online]. 23.4.2010 [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: <http://www.ucebnice.krynicky.cz/Fyzika/>
- [41] Titan [online]. [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/22.html>

Seznam symbolů, veličin a zkratk

%	Procento.
□	Čtverec.
°C	Stupeň Celsia.
°K	Stupeň Kelvína.
μm	mikrometr.
A	Ampér.
Al	Hliník.
Ar	Argon.
bar	Bar jednotka barometrického tlaku.
cm	Centimetr.
Cr	Chróm.
CVD	Chemical Vapour Deposition , chemická depozice z plynné fáze.
dm	Decimetr.
DPS	Deska Plošných Spojů.
e	Náboj elektronu.
eV	Elektronvolt.
g	Gram.
Ge	Germanium.
H	Vodík.
I	Elektrický proud.
IBAD	Depozice s asistencí iontového paprsku.
IBDS	Odprašování iontovým paprskem.
kg	Kilogram.
kV	Kilovolt.
kW	Kilowatt.
kJ	Kilojoule.
m	Metr.
m	Hmotnost vyloučeného materiálu.
mm	Milimetr.
M _m	Molární hmotnost.
Mo	Molybden.
mΩ	Miliohm.
N _A	Avogardova konstanta.
ng	Nanogram.
nm	Nanometr.
NP - 12	Naprašovací zařízení.
nΩ	Nanoohm.
O	Kyslík.
Pa	Pascal.
PVD	Physical Vapour Deposition, fyzikální depozice z plynné fáze.
QCM	Quartz Crystal Microbalance, křemenné krystalové mikrováhy.
Ra	Drsnost povlaku.

S	Síra.
s	Sekunda.
sccm	Standard cubic centimeter per minute, kubický centimetr za minutu.
Si	Křemík.
t	Čas pokovení.
Ta	Tantal.
TKE	Součinitel teplotní roztažnosti.
Torr	Jednota tlaku, milimetr rtuťového sloupce.
TV	Tenká Vrstva.
UV	Ultra Violet, ultrafialové.
V	Volt.
V	Objem.
VUT	Vysoké Učení Technické.
W	Watt.
Δf	Frekvenční změna.
ρ	Hustota vylučovaného materiálu.
Ω	Ohm.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1 Proces elektrodpozice	4
Obrázek 1.2 Princip metod Dip-coating a Spin-coating.	4
Obrázek 1.3 Princip CVD depozice. Převzato z [8].	5
Obrázek 1.4 Princip vakuového napařování. Převzato z [8].....	6
Obrázek 1.5 Vakuový systém katodového naprašování. Převzato z [7].....	7
Obrázek 1.6 Vlevo schéma metody magnetronového naprašování [11], s ukázkou použitého měděného targetu vpravo	9
Obrázek 1.7 Schématické znázornění elektrického a magnetického pole u planárního uspořádání katody pro magnetronové naprašování. Převzato z [14].	9
Obrázek 1.8 Pohyb elektronu v elektrickém a magnetickém poli. B – směr magnetického pole, E – směr elektrického pole, v – vektory rychlosti elektronu. Převzato z [14].	9
Obrázek 1.9 Postup vytváření vrstvy Ag na MoS ₂ podle Pashleye [2], a) narostlá jádra, b) růst jader, c) srůstání ostrůvků, d) zaplňování kanálků.	11
Obrázek 1.10 podložky pro tenké vrstvy	12
Obrázek 1.11 Naprašená vrstva mědi na neočištěný skleněný substrát.....	12

Obrázek 1.12 čištění ultrazvukem	14
Obrázek 1.13 měření metodou QCM: a) přístroj pro měření rychlosti nanášení vrstvy a její tloušťky, b), c), d) krystaly QCM z leva: nový, poškozený, nefunkční	16
Obrázek 1.14 Kapacitní měření tloušťky vrstvy	17
Obrázek 1.15 Schéma principu funkce magneticko-indukční sondy.....	17
Obrázek 1.16 Princip ultrazvukové metody	18
Obrázek 1.17 Ukázka přístroje pro bezkontaktní měření plošného odporu [21].....	19
Obrázek 1.18 schematické znázornění čtyřhrotové metody [22].....	19
Obrázek 1.19 schematické znázornění van der Pauwovy metody [22]	20
Obrázek 1.20 Příklady řezných nástrojů [24]	21
Obrázek 1.21 Klasifikace výsledků mřížkových zkoušek [24].	21
Obrázek 1.22 Fotolitografie u pozitivního a negativního fotorezistu [27].	24
Obrázek 2.1 Ventily v místnosti s naprašovačkou.....	30
Obrázek 2.2 naprašovací zařízení NP -12.....	30
Obrázek 2.3 Pracovní komora s měděným targetem vpravo	31
Obrázek 2.4 Křemíkový wafer typu N s rozměry a naznačenými osami Millerových indexů.....	33
Obrázek 2.5 Pohled okénkem na zapálenou plazmu	34
Obrázek 2.6 Ukázka otupělého ostří před výměnou.....	35
Obrázek 2.7 Sada pro zhotovení mřížkové metody	35
Obrázek 2.8 Polohy lepící pásky [24].....	36
Obrázek 2.9 Nanesené vrstvy na skle (levý: Cu, pravý: Ti).	36
Obrázek 2.10 skleněný substrát s mřížkou po odtržení pásky (levý: Cu, pravý: Ti).36	
Obrázek 2.11 Nanesené vrstvy na korundové keramice (levý: Cu, pravý: Ti).....	37
Obrázek 2.12 Korundový substrát s mřížkou po odtržení pásky (levý: Cu, pravý: Ti).	37
Obrázek 2.13 Nanesené vrstvy na křemíkovém waferu (levý: Cu, pravý: Ti).	38
Obrázek 2.14 Křemíkový substrát s mřížkou po odtržení pásky (levý: Cu, pravý: Ti).	38
Obrázek 2.15 Křemíkový substrát po odloupení pásky vlevo, vpravo páska s odloupenou mědí.....	38
Obrázek 2.16 Nanesené vrstvy na hliníkovém plechu (levý: Cu, pravý: Ti).....	39

Obrázek 2.17 Hliníkový substrát s mřížkou po odtržení pásky (levý: Cu, pravý: Ti).	39
Obrázek 2.18 Nanesené vrstvy na polystyrenu (levý: Cu, pravý: Ti).....	40
Obrázek 2.19 Polystyrenový substrát s mřížkou po odtržení pásky (levý: Cu, pravý: Ti).....	40
Obrázek 2.20 Výsledky mřížkové metody.	41
Obrázek 2.21 Sestava pro galvanizaci mědi.	41
Obrázek 2.22 Vzorek ponořený v elektrolytu.....	43
Obrázek 2.23 Korundový vzorek (levý focen fotoaparátem, pravý mikroskopem).	43
Obrázek 2.24 Skleněný vzorek (levý vyfocen fotoaparátem, pravý mikroskopem).	44
Obrázek 2.25 Křemíkový vzorek (levý vyfocen fotoaparátem, pravý mikroskopem).	44
Obrázek 2.26 Hliníkový vzorek (levý vyfocen fotoaparátem, pravý mikroskopem).	44
Obrázek 2.27 Vzorek z polystyrenu (levý vyfocen fotoaparátem, pravý mikroskopem).	45
Obrázek 2.28 Skleněný substrát po vytažení z elektrolytu.	45
Obrázek 2.29 První část cyklu nanesení – vyvolání fotorezistu (vlevo zalaminovaný wafer ve fotorezistu, vpravo wafer umístěný v držáku)	46
Obrázek 2.30 Další část cyklu nanesení – vyvolání fotorezistu. (vlevo substrát po osvit, vpravo výsledný motiv na substrátu)	46

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1 Chemické složení sodnodraselného skla [29].....	26
Tabulka 2.2 Fyzikální a chemické vlastnosti sodnodraselného skla [29].....	26
Tabulka 2.3 fyzikální vlastnosti Al_2O_3 [30].....	27
Tabulka 2.4 Fyzikální vlastnosti křemíku [33].	27
Tabulka 2.5 Fyzikální vlastnosti hliníku [34].	28
Tabulka 2.6 Fyzikální vlastnosti polystyrenu [36].	29
Tabulka 2.7 Hodnoty pro galvanické pokovení jednotlivých substrátů	42